



Pia Vuorela

Laskentatyökalu laippojen ja laippaliitosten kiristysmomenttien nopeaa määrittelyä varten

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 7.4.2019

Valvoja: Apulaisprofessori Arttu Polojärvi

Ohjaaja: DI Jukka Koistinen

Tekijä Pia Vuorela

Työn nimi Laskentatyökalu laippojen ja laippaliitosten kiristysmomenttien nopeaa määrittelyä varten

Koulutusohjelma Konetekniikan maisteriohjelma

Pää-/sivuaine Lujuusoppi

Koodi ENG25

Työn valvoja Apulaisprofessori Arttu Polojärvi, TkT

Työn ohjaaja(t) DI Jukka Koistinen

Päivämäärä 7.4.2019

Sivumäärä 59 + 37

Kieli suomi

Tiivistelmä

Kasvanut ympäristötietoisuus on herättänyt huomioimaan myös teollisuuden aiheuttamat hajapäästöt, joita syntyy esimerkiksi haitallisten aineiden vuotaessa ympäristöön putkistojen liitoskohdista. Liitosmenetelmänä yleisesti käytettävän ruuvikiinnitteisen laippaliitoksen tiiviys perustuu muun muassa sen ruuvien oikeansuuruiseen kiristysmomenttiin. Tämä kiristysmomentti on usein määriteltävä liitoskohtaisesti, ja liitosten suuri lukumäärä herättää tarpeen työkalulle kiristysmomentin nopeaa määrittämistä varten.

Tässä opinnäytetyössä luotiin standardiin GOST R 52857.4:2007 (GOST) perustuva Excel-pohjainen laskentatyökalu laippojen ja laippaliitosten kiristysmomenttien määrittelyä varten vaihtoehtoksi standardin SFS-EN 1591-1:2014 (EN) mukaiselle työlälle ja aikaa vievälle menetelmälle. Laskentatyökalu rakennettiin kattamaan yleisimmät laippatyypit PSK:n laatimien putkiluokkastandardien mukaisesti. Työn teoriaosuudessa tarkasteltiin ruuvikiinnitteisen laippaliitoksen joustavuuteen ja tiiviyteen vaikuttavia tekijöitä.

Laskentatyökalun tulokset verifioitiin käsin laskemalla sekä varmistamalla tulosten johdonmukaisuus tiettyjen laippaliitosten perusoletusten kanssa. Vertailut EN-standardin mukaan laskettuihin tuloksiin osoittivat, että vaikka GOST-standardin mukaan määritellyt kiristysmomentit olivat linjassa EN-standardin tulosten kanssa, olivat jälkimmäisen mukaan määritellyt kiristysmomentit pääosin suurempia. Tämä ero kaventui painekuorman kasvaessa ja kääntyi jopa toisin päin. Myös laippojen tyypin havaittiin vaikuttavan tarvittavan kiristysmomentin suuruuteen. Laskentatyökalulla suoritettiin myös herkkyysanalyysijä kiristysmomentin suuruuteen vaikuttavista tekijöistä. Nämä analyysit osoittivat, että tiivisteiden tyypillä oli tietty vaikutus kiristysmomentin suuruuteen, kun taas liitoksen lämpötilan vaikutus oli merkityksetön. Herkkyysanalyysien tulokset eivät ole sovellettavissa EN-standardin mukaiselle laskentamenetelmälle sen erilaisen lähestymistavan vuoksi.

Tulosten huomattavien erojen vuoksi laskentatyökalu ei korvaa EN-standardin mukaista laskentamenetelmää. Työkalu on kuitenkin nopeakäyttöinen ja näin ollen hyvä apuväline tarkasteltaessa painekuormituksen vaihtelun merkitystä tarvittavaan kiristysmomenttiin. Tarkasteluja olisi suotavaa laajentaa kattamaan liitoksia, joissa laippatyypit poikkeavat toisistaan. Tässä työssä tehdyn kaltaisia herkkyysanalyysijä olisi hyödyllistä tehdä myös standardin SFS-EN 1591-1:2014 esittelemälle laskentatavalle.

Avainsanat kiristysmomentti, laippaliitos, EN 1591-1, GOST R 52857.4



Author Pia Vuorela

Title of thesis Tool for time efficient flange calculation and tightening torque assessment

Degree programme Master's programme in Mechanical Engineering

Major/minor Solid mechanics

Code ENG25

Thesis supervisor Assistant Professor Arttu Polojärvi, D.Sc. (Tech)

Thesis advisor(s) Jukka Koistinen, M. Sc. (Tech)

Date 7.4.2019

Number of pages 59+37

Language Finnish

Abstract

An increased environmental awareness has roused the industry to fugitive emissions occurring, for example, when harmful substances leak through from piping joints. A common joining method for pipes is a bolted flange joint for which tightness is determined, among other things, by a proper tightening torque. This torque is often required to be assessed individually and the large number of joints therefore generates the need for a time efficient assessment tool.

In this thesis an Excel-based calculation tool for flange calculation and tightening torque assessment was created. The tool was based on the standard GOST R 52857.4:2007 (GOST) and it was created as an alternative for the laborious and time-consuming calculation method presented in SFS-EN 1591-1:2014 (EN). The tool was built to cover the most commonly used flange types in accordance with PSK pipe class standards. This thesis also covers the theory behind the flexibility of a bolted joint and the factors affecting its tightness.

The calculations were verified by thorough manual calculations, as well as by ensuring the accordance to certain basic assumptions regarding flange joints. A comparison showed that the results were in line with the results given by the EN standard. Nevertheless, the tightening torque values given by GOST were for the most part smaller than those given by EN, although this difference decreased as the pressure load increased or even turned the other way around. In addition, the type of the flange was found to affect the required torque. Additional sensitivity analyses on factors affecting the tightening torque given by the GOST-standard were performed. These analyses indicated that the type of gasket in the joint had some effect on the torque whereas the effect of temperature was insignificant. The results given by the sensitivity analyses are not applicable to the EN-standard due to their different approach.

Because of the large differences in the results, the calculation tool cannot substitute calculations according to the EN-standard. The created tool is, however, a quick and useful aid when studying the effect of varying pressure load on the needed torque. For further studies, it is recommended to extend the examination to cover flange joints with the pair consisting of different type of flanges. It would also be advisable to carry out sensitive analyses, such as those made in this work, for the calculation method presented in standard SFS-EN 1591-1:2014.

Keywords bolting torque, flange joint, EN 1591-1, GOST R 52857.4

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston tekniikan tukisäätiön sekä Sweco Industry Oy:n tuella.

Haluan osoittaa kiitokseni PSK Standardisointiyhdistyksen DI Jukka Koistiselle työni ohjauksesta sekä Sweco Industry Oy:n insinööri Olli-Pekka Joroselle kaikesta hänen avustaan navigoidessani laippaliitosten kiehtovassa maailmassa.

Apulaisprofessori Arttu Polojärveä kiitän työni arvioimisesta.

Erityiskiitokset haluan osoittaa Sweco Industry Oy:n insinööri Piritta Taylanille, joka on jaksanut toimia kaikupohjana lukemattomille aiheeseen liittyville pohdiskeluilleni. Olet ollut korvaamaton.

Kiitän myös koko sydämestäni perhettäni, joka on tukenut minua tämän prosessin ajan. Lupaan jälleen osallistua kotitöihin.

Helsingissä 5.4.2019

Pia Vuorela

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Merkinnät	7
Lyhenteet.....	8
1 Johdanto	9
1.1 Tausta	9
1.2 Työn tavoitteet ja raja- aus	10
1.3 Työn rakenne	11
2 Laippaliitos.....	12
2.1 Laippatyypit.....	12
2.2 Laippojen paineluokittelu	14
2.3 Tiivisteet.....	15
3 Laippaliitoksen tiiviys	17
3.1 Pintapaineen muodostaminen	17
3.2 Laippaliitoksen joustavuus	19
3.3 Pintapaineen muuttuminen käytön aikana	21
3.4 Laippojen kiertyminen	24
3.5 Laippaliitoksen vioittuminen	24
4 Työssä käytettävät laskentastandardit	26
4.1 GOST R 52857.4:2007	26
4.2 SFS-EN 1591-1:2014	26
4.3 Laskentastandardien yhtäläisyyksiä ja eroavaisuuksia.....	27
5 Laskentatyökalu	29
5.1 Rajoitukset.....	29
5.2 Tarvittavat lähtötiedot	30
5.2.1 Laippaliitoksen osien materiaalit	30
5.2.2 Laipan nimelliskoko, paineluokka ja tyyppi	30
5.2.3 Laskentapaineet, laskentalämpötilat sekä liitokseen vaikuttavat ulkoiset kuormitukset.....	31
5.2.4 Liittyvän putken ulkohalkaisija, seinämänvahvuus ja korroosiovara	31
5.2.5 Liitoksen komponenttien keskilämpötilat	31
5.2.6 Laippojen ja ruuvien suunnittelujännitykset	31
5.2.7 Liitoksen osien kimmokertoimet ja lämpölaajenemiskertoimet	32
5.2.8 Laippojen ja tiivisteiden mitat sekä ruuviparametrit	32
5.2.9 Tiivisteparametrit	32
5.3 Ohjelman antamat tulokset.....	33
5.3.1 Kiristysmomentti.....	33
5.3.2 Laippaliitoksen komponenttien kuormitustaso ja laippojen kiertymä	33
5.4 Laskentaohjelmalla toteutettu esimerkkilaskelma.....	33
5.4.1 Lähtötietojen syöttö.....	34
5.4.2 Laskentaosuus	35
6 Verifiointi.....	41
6.1 Yleistä tehdyistä laskennoista	41
6.2 Verifiointissa käytetyt oletukset	42
7 Laskentatyökalun antamien tulosten vertailu standardin SFS-EN 1591-1:2014 antamiin tuloksiin.....	44

7.1	Kauluslaipparakenteita koskeva vertaileva laskenta	44
7.2	Irtolaippa-kaulusrakenteita koskeva vertaileva laskenta	46
7.3	Vertaileva laskenta ja ulkoiset kuormitukset.....	47
8	Herkkyysanalyysit.....	49
9	Pohdinta	51
10	Yhteenveto	55
	Lähdeluettelo.....	57
	Liitteet	
Liite 1	Esimerkkilaskelma	
Liite 2	Verifiointilaskelma	

Merkinnät

A_b	[mm ²]	ruuvin kierteitetyn osan pienin poikkipinta-ala
A_g	[mm ²]	tiivisteen pinta-ala
B	[-]	laipan kauluksen mittasuhteista riippuva kerroin
E_b	[MPa]	ruuvimateriaalin kimmokerroin
E_{b2}	[MPa]	ruuvimateriaalin kimmokerroin korkeammassa lämpötilassa
E_f	[MPa]	laippamateriaalin kimmokerroin
E_g	[MPa]	tiivisteen kimmokerroin
F_b	[N]	ruuvivoima
F_b^A	[N]	esikiristysvoima
F_b^T	[N]	ruuvivoima korkeammassa lämpötilassa
F_g	[N]	tiivisteeseen kohdistuva voima
K_b	[N/mm]	ruuvin jousivakio
K_f	[N/mm]	laipan aksiaalinen jousivakio
K_{fM}	[Nmm/rad]	laipan kiertojoustavuus
K_g	[N/mm]	tiivisteen jousivakio
K_{TOT}	[N/mm]	laippaliitoksen kokonaisjousivakio
L	[-]	laipan mitoista riippuva kerroin
L_b	[mm]	ruuvin joustopituus
M_f	[Nmm]	laippaan kohdistuva momentti
S_o	[mm]	laipan kauluksen ohuimman osan paksuus
a	[mm]	ruuvivoiman momenttivarsi
t_g	[mm]	tiivisteen paksuus
x_b	[mm]	ruuvin pituuden muutos
x_f	[mm]	kiertymästä aiheutuva laipan aksiaalinen siirtymä
x_g	[mm]	tiivisteen paksuuden muutos
ε	[-]	venymä
θ_f	[rad]	laipan kiertymä
ν	[-]	Poissonin vakio
σ	[MPa]	ruuviin syntyvä vetojännitys

Lyhenteet

ASME	The American Society of Mechanical Engineers on amerikkalainen organisaatio, joka laatii myös standardeja
Class	amerikkalainen putkistokomponenttien paineluokittelu (vertaa eurooppalainen PN)
DN	nimellishalkaisija, putken kokoon viittaava dimensioton luku
EN	European Standards, eurooppalainen standardi
GOST	Gosudarstvennyy Standart, venäläinen standardi
PN	eurooppalainen putkistokomponenttien paineluokittelu (vertaa amerikkalainen Class)
PSK	PSK Standardisointiyhdistys ry (PSK Standardisointi) on kansallinen yleishyödyllinen ja riippumaton teollisuuden standardisointiorganisaatio
SFS	Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Suomen standardisoinnin keskusjärjestö
putkiluokkastandardi	putkistokomponentteja sisältävä standardi, jossa esiintyvät komponentit on mitoitettu kestäämään kyseisen putkiluokkastandardin nimellispaine huoneenlämpötilassa

1 Johdanto

1.1 Tausta

Kasvaneen ympäristötietoisuuden myötä teollisuuden aiheuttamien päästöjen rajoittamiseen on ryhdytty kiinnittämään enenevissä määrin huomiota. Yksi huomion kohteeksi noussut päästöryhmä on hajapäästöt eli teollisuuslaitosten niin kutsutut suunnittelemattomat päästöt. Hajapäästöjä syntyy esimerkiksi silloin, kun haitallisia aineita pääsee vuotamaan ympäristöön prosessiputkistojen liitoskohdista. Ympäristöhaittojen lisäksi tällaiset vuodot aiheuttavat aina myös turvallisuusriskin sekä tuovat mukanaan taloudellisia menetyksiä.

Eräs teollisuudessa yleisesti käytössä oleva liitosmenetelmä, ruuvikiinnitteinen laippaliitos, on kahden laipan ja tiivisteen muodostama liitos. Yhdessä teollisuuslaitoksessa voi olla jopa tuhansia kuvassa 1 esitetyn kaltaisia laippaliitoksia. Yksittäisen laippaliitoksen aiheuttama päästö määrä voi olla hyvinkin pieni, mutta haitta voi kumuloitua liitosten suuren lukumäärän vuoksi merkittäväksi.

Laippaliitoksen tiiviyden varmistamiseksi täytyy liitoksen kiinnitysruuvit kiristää asennettaessa oikeaan kiristysmomenttiin. Liian pieneen momenttiin kiristetty liitos ei purista tiivistettä riittävästi ja voi näin johtaa vuotavaan liitokseen. Liian suureen momenttiin kiristetty liitos voi vuorostaan vaurioittaa laippaa tai aiheuttaa joko ruuvien tai tiivisteiden rikkoutumisen, jolloin lopputuloksena on myöskin vuotava liitos. Pelkkä oikeansuuruisen kiristysmomentin määrittäminen ei itsessään takaa tiivistä liitosta, vaan tarvittava voima täytyy myös saada välitettyä ruuvien ja laippojen kautta tiivisteeseen. Myös liitoksen oikean asennustavan merkitys liitoksen tiiviuteen on huomattu ja laippaliitosten asentajilta on ryhdytty vaatimaan standardin SFS-EN 1591-4 mukaista koulutusta ja pätevöinnin osoittamista.



Kuva 1. Prosessiputkistossa olevia laippaliitoksia (Cardan Engineering Projects LLP).

Laippojen ja laippaliitosten kiristysmomenttien määrittelemiseksi on olemassa useita maa- ja maanosakohtaisia laskentastandardeja. Eurooppalaisen laskentastandardin SFS-EN 1591-1:2014 mukainen laskentamenettely on pitkä ja seikkaperäinen, tehden kiristysmomentin määrittelemisen työlääksi ja aikaa vieväksi. Venäläisen laskentastandardin GOST R 52857.4:2007 mukainen laskentamenettely on suoraviivaisempi, vastaten kuitenkin tämänhetkisen tietämyksen mukaan menetelmältään standardia SFS-EN 1591-1:2014.

Laippaliitoksen ruuvien kiristysmomentti on usein liitoskohtaisesti määriteltävä suure, koska tarvittavan kiristysmomentin suuruus riippuu useista eri tekijöistä, jotka tavallisesti vaihtelevat eri liitosten välillä. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa laipan koko ja tyyppi, liitoksen osien materiaalit, käyttöolosuhteet (paine ja lämpötila), tiivisteen tyyppi ja materiaali, ruuvien koko ja lukumäärä sekä niiden voitelu. Muuttujien moninaisuus on johtanut siihen, että kattavia kiristysmomenttitaulukoita ei ole saatavilla. Standardi PSK 6403:2011 antaa ohjeellisia kiristysmomenttien arvoja joillekin PSK 42 ryhmän putkiluokkien mukaisille laippaliitoksille tietyissä lämpötiloissa ja suuntaa antavilla tiivisteparametrien arvoilla.

Tarkasteltavien laippaliitosten suuren lukumäärän vuoksi tulisi laippakohtaiset ruuvien kiristysmomentit voida määrittää sarjatyönä, jotta siihen tarvittava työmäärä pysyisi kohtuullisissa rajoissa. Tällä hetkellä ei kuitenkaan ole olemassa yleisesti saatavilla olevaa työkalua, joka mahdollistaisi tämän. Standardin GOST R 52857.4:2007 yksinkertaisempi lähestymistapa mahdollistaa tällaisen laskentatyökalun kehittämisen. Nopeakäyttöisempi ja käyttäjäystävällisempi työkalu mahdollistaisi esimerkiksi myös sen, että paljon käytettyjä PSK 42 ryhmän putkiluokkastandardeja voitaisiin täydentää nykyistä kattavammilla kiristysmomenttitiedoilla. Tätä kautta informaatio oikeansuuruisista kiristysmomenteista saataisiin myös laajempaan tietouteen.

Kiristysmomenttien määrittelyn työläisyys on johtanut myös siihen, että kokeellista laskentaa eri muuttujien merkityksestä kiristysmomentin suuruuteen ei ole ollut mielekäästä suorittaa. Nopeampikäyttöisen työkalun avulla olisi mahdollista haarukoida kiristysmomenttien käyttöalueita ja täten välttyä turhalta uudelleenlaskennalta niissä tapauksissa, joissa liitoksen laskentaparametreissa tapahtuva muutos ei merkittävästi vaikuta tarvittavan kiristysmomentin suuruuteen.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Tämän diplomityön päätavoitteena oli laatia standardiin GOST R 52857.4:2007 perustuva Excel-pohjainen laskentatyökalu. Työkalun tuli olla riittävän yksinkertainen ja nopeakäyttöinen, jotta laippojen ja laippaliitosten kiristysmomenttien määrittely voitaisiin toteuttaa sen avulla sarjatyönä. Laskentatyökalun tuli myös kattaa yleisimmät käytössä olevat laippatyypit kaikissa niissä nimellispaineluokissa, joille on olemassa PSK:n putkiluokkastandardi. Laskentatyökalu verifioitiin vertaamalla siitä saatuja tuloksia käsin laskettuihin esimerkkeihin sekä standardin SFS-EN 1591-1:2014 mukaan laskettuihin tuloksiin.

Lisäksi tavoitteena oli tehdä herkkyysanalyysijä laippaliitoksen kiristysmomenttiin vaikuttavista tekijöistä. Kuinka suuri vaikutus tiivisteellä on tarvittavaan kiristysmomenttiin? Kuinka suuressa roolissa laippa ja sen rakenne ovat? Entä miten kiristysmomenttiin vaikuttavat laippaan kohdistuva paine ja lämpötila? Herkkyysanalyysien tavoitteena oli

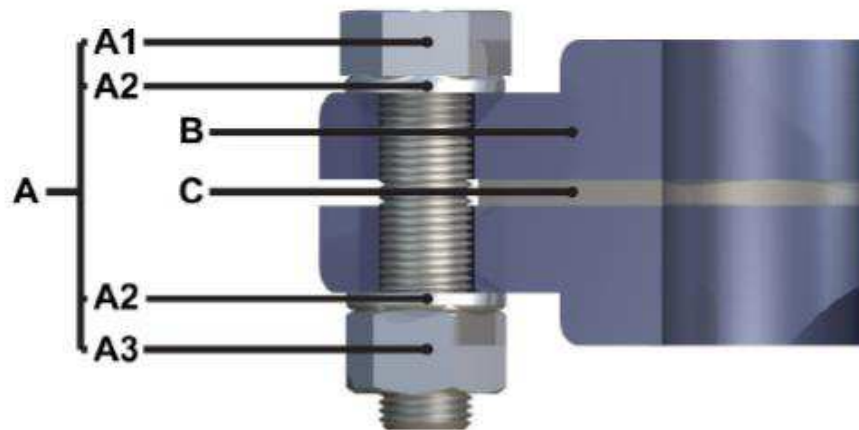
saada lisäinformaatiota jo kertaalleen laskettujen kiristysmomenttien käyttöalueista. Työn teoriaosuus ei kata laippaliitoksen lujuustarkastelua. Työn ulkopuolelle rajattiin myös laippaliitoksen oikeaoppinen asentaminen ja muut tekijät, jotka kiristysmomentin ohella vaikuttavat laippaliitoksen tiiviyteen.

1.3 Työn rakenne

Tämä diplomityö on jaettu kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa perehdytään laippoihin ja laippaliitokseen yleisellä tasolla, liitoksen joustavuuteen lujuusopillisesta näkökulmasta sekä liitoksen tiiviyteen vaikuttaviin tekijöihin. Tämän lisäksi tutustutaan työn kannalta oleellisiin laskentastandardeihin ja niiden mahdollisiin eroavaisuuksiin. Toisessa osassa käydään läpi laskentatyökalun asettamat rajoitukset, laskennassa tarvittavat lähtötiedot sekä laskentatyökalun antamat tulosteet. Laskentatyökalun käyttöä esitellään laskentaesimerkin avulla, jonka jälkeen selostetaan laskentatyökalun verifiointi ja siinä käytetyt menetelmät. Kolmannessa osassa verrataan laskentatyökalun antamia tuloksia standardin SFS-EN 1591-1:2014 esittelemän laskentamenetelmän antamiin tuloksiin. Lopuksi tutkitaan tehtyjä herkkyyksianalyyskejä kiristysmomentin muuttujariippuvuuksista sekä pohditaan laskentatyökalun mahdollisia jatkokehitystarpeita.

2 Laippaliitos

Laippaliitos muodostuu kahdesta laipasta, niiden kiinnitykseen tarvittavista osista sekä laippojen väliin sijoittuvasta tiivisteestä (kuva 2). Kiinnityselementti (A) koostuu ruuvista (A1), mutterista (A3) sekä mahdollisesti käytettävistä aluslevyistä (A2). Aluslevyjä voi kuvasta poiketen olla enemmän kuin yksi kappale kutakin liitospintaa kohden. Ruuvien sijasta voidaan kiinnittimenä käyttää myös kierretankoa tai vaarnaruuvia, jolloin liitoksessa on mutterit molemmissa päissä. Muita laippaliitokseen kuuluvia osia ovat laipat (B) ja tiiviste (C).



Kuva 2. A= kiinnitysosat (A1 = ruuvi, A2 = aluslevyt, A3 = mutteri); B= laippa; C= tiiviste (FSA Gasket Handbook 2017)

Ruuvikiinnitteisiä laippaliitoksia käytetään vaihtoehtoina hitsattaville liitoksille kohteissa, joissa liitoksen avattavuus ja uudelleen suljettavuus on oleellinen tekijä. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi putkiston liitokset säiliöihin tai johonkin laitteeseen, kuten pumppuun. Myös putkilinjaan sijoitettavat venttiilit ja muut toimilaitteet kiinnitetään yleisesti laippaliitoksiin. (Parisher & Rhea 2002)

Laippa- ja tiivisterakenteita on useita erilaisia, minkä lisäksi näistä perusrakenteista on olemassa lukuisia tyyppivariaatioita. Tässä luvussa esitellään ainoastaan ne laippa- ja tiivistetyypit, jotka ovat yleisyytensä perusteella sisällytetty laskentatyökalun oletuskomponenteiksi. Tiivisteidien osalta tämä kattaa ainoastaan tasotiivisteet, koska se on prosessiteollisuudessa yleisimmin käytössä oleva tiivistetyyppi.

2.1 Laippatyypit

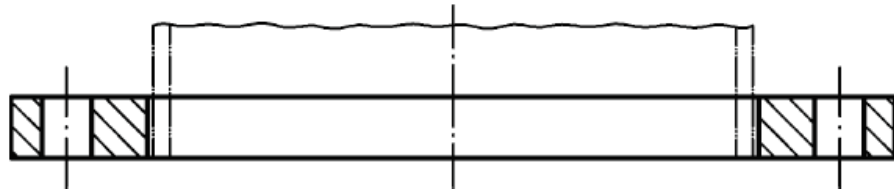
Laipat voidaan jaotella ryhmiin usein eri perustein. Eräs käytännössä yleinen peruste on laippojen jaottelu yhdestä osasta muodostuviin laippoihin (kiinteä laippa) ja kahdesta osasta muodostuviin laippoihin (erillisestä irtolaipasta ja kauluksesta koostuva laippa). Jaotteluperusteina voidaan myös käyttää esimerkiksi laipan kiinnitystapaa liittyvään putkeen tai laipan tiivistepinnan muotoa (Huitt 2007). Laippaliitoksen muodostavien kahden laipan ei tarvitse olla rakenteeltaan samanlaisia, kunhan liitettävien laippojen ruuviympyrän halkaisija, tiivistepinnan tyyppi sekä kiinnitysruuvien reikien lukumäärä vastaavat toisiaan.

Yksi yleisesti käytetty laippatyyppi on kuvassa 3 esitetty standardin EN 1092-1:2018 mukainen hitsattava kauluslaippa (tyyppi 11). Kauluslaipan tunnuspiirteenä on sen rakenteen jäykkyyttä lisäävä kaulusosa, joka ohenee jouhevasti kohti laipan putkeen hitsattavaa päätä. Laippa kiinnitetään liittyvään putkeen päittäishitsillä. Tukevan rakenteensa takia kauluslaippa on suositeltava valinta kohteisiin, joissa liitokseen kohdistuva painekuorma on suuri tai joissa liitokseen tiedetään kohdistuvan merkittäviä ulkoisia kuormituksia. (Parisher & Rhea 2002)



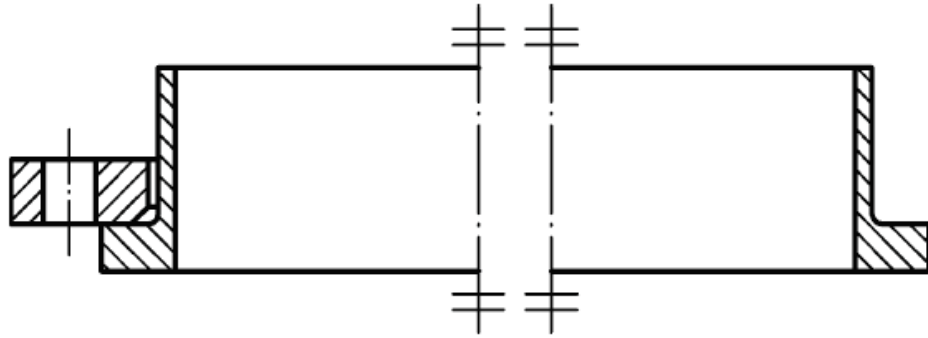
Kuva 3. Hitsattava kauluslaippa, EN 1092-1 tyyppi 11 (SFS-EN 1092-1:2018)

Kuvassa 4 esitetty standardin SFS-EN 1092-1:2018 mukainen levylaippa (tyyppi 01). Tässä laippatyyppissä ei ole erillistä kaulusosaa, vaan sen rakenne koostuu yksinomaan suoraan putkeen hitsattavasta levymäisestä laippaosasta. Levylaippojen käyttö ei ole yleistä putkistoissa, mutta sitä käytetään yleisesti pienipaineisten laitteiden yhteiden ja miesluukkujen laippaliitoksissa. Liitosta ei voida toteuttaa päittäishitsillä, joten kiinnittäminen toteutetaan yleensä kahdella pienahitsillä. Yksinkertaisen rakenteensa ansiosta levylaippa on helppo valmistaa ja on tästä syystä kauluslaippaa edullisempi vaihtoehto. Kaulusosan puuttuminen ja laipan liitostapa johtavat kuitenkin siihen, että levylaippa ei ole yhtä jäykkä ja kuormitusta kestävä kuin kauluslaippa. (Parisher & Rhea 2002)



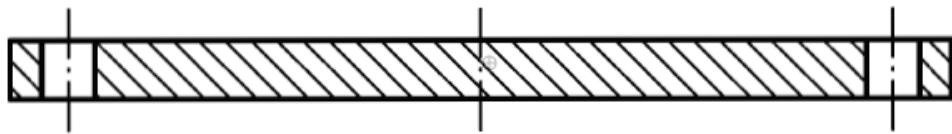
Kuva 4. Levylaippa, EN 1092-1 tyyppi 01 (SFS-EN 1092-1:2018)

Irtolaippa-kaulusrakenteinen laippa poikkeaa edellä esitetyistä laipoista siinä, että se koostuu kahdesta osasta: liittyvään putkeen hitsattavasta kauluksesta sekä siihen tukeutuvasta erillisestä irtolaipasta. Eräs tällainen standardin SFS-EN 1092-1:2018 mukaisesta irtolaipasta (tyyppi 02) ja kaulusrakenteesta (tyyppi 35) koostuva laipparakenne on esitetty kuvassa 5. Irtolaippa-kaulusrakenne ei kestä yhtä suurta painekuormaa kuin kauluslaippa, koska sen rakenne ei ole yhtä tukeva. Rakenteen etu esimerkiksi kauluslaippaan verrattuna syntyy sen erillisistä osista, jotka mahdollistavat niiden valmistamisen eri materiaaleista. Virtaavan aineen kemialliset ominaisuudet asettavat usein vaatimuksia sen kanssa kosketuksissa olevalle materiaalille. Nämä vaatimukset ovat miltei poikkeuksetta materiaalin hintaa korottavia tekijöitä. ErillISRakenteen ansiosta ainoastaan virtaavan aineen kanssa kosketuksissa oleva kaulusosa on valmistettava tästä vaatimuksiltaan paremmasta materiaalista, kun taas irtolaisen laippaosan materiaaliksi voidaan valita jokin hinnanaltaan halvempi materiaali (PSK 4232:2017). Toinen irtolaippa-kaulusrakenteen etu on sen helpompi asennettavuus. Irtolaipan asentoa voidaan muuttaa asennuksen yhteydessä, jolloin ruuvireikien kohdentaminen liitoksen toisen laipan ruuvireikiin on helpompaa. (Huitt 2007)



Kuva 5. Irtolaippa-kaulusrakenne, EN 1092-1 tyyppi 02/35 (SFS-EN 1092-1:2018)

Laippoja voidaan käyttää myös avonaisen putken päään sulkemiseen. Kuvassa 6 on esitetty tähän tarkoitukseen käytettävä standardin SFS-EN 1092-1:2018 mukainen umpilaippa (tyyppi 05). Putken pää voidaan haluta sulkea esimerkiksi silloin, jos putkilinjaa ollaan jatkamassa myöhemmin tai kun putkistolle suoritetaan koeponnistus ennen sen käyttöönottoa. Koeponnistuksessa putkisto täytetään vedellä tai kaasulla ja paineistetaan sen suunnittelupainetta korkeampaan paineeseen. Tällä testauksella varmistetaan käyttöön otettavan putkiston riittävä kestävyys. (SFS-EN 13480-5:2017) Umpilaipat voidaan helposti irrottaa testauksen jälkeen ja putkisto kiinnittää uudelleen esimerkiksi painesäiliöön. Laippaliitoksen tiiviste vaihdetaan yleensä aina kun laippaliitos suljetaan uudestaan.



Kuva 6. Umpilaippa, EN 1092-1 tyyppi 05 (SFS-EN 1092-1:2018)

Kuten aikaisemmin mainittiin, voidaan laipat jakaa alaryhmiin myös niiden tiivistepinnan muodon perusteella. Laipan tiivistepinta voi olla esimerkiksi tasainen, korotettu tai uralinen. Tiivistepinnan muodolla pyritään vaikuttamaan laipan ja tiivisteiden välisen kontaktipinnan sijaintiin ja suuruuteen. Tiivistepintojen eroavaisuuksia ja niiden vaikutusta laippaliitokseen ei käsitellä tässä työssä.

2.2 Laippojen paineluokittelu

Teollisuudessa käytettävät laipat luokitellaan niiden kuormituksen keston mukaan. Yleisesti puhutaan laipan paineenkestosta eli paineluokasta, vaikka laippaan kohdistuva kokonaiskuormitus koostuu myös muista tekijöistä kuin laippaan liitetyn putkilinjan sisäisestä paineesta. Tällaisia muita tekijöitä ovat esimerkiksi putkilinjasta laippaan kohdistuvat ulkoiset voimat ja momentit. Kuormitustarkasteluja tehtäessä muut kuormitukset muutetaan ekvivalenteiksi painekuormiksi (SFS-EN 1591-1:2014; GOST R 52857.4:2007).

Yleisimmin käytetyt paineluokittelut ovat eurooppalainen PN-luokittelu ja amerikkalainen Class-luokittelu. PN-luokittelu käyttää paineesta yksikköä bar ja Class-luokittelu yksikköä psi. PN-luokitelluissa laipoissa paineluokka ilmaisee laipan paineenkeston huoneenlämpötilassa. Esimerkiksi PN 10 laipan paineenkesto huoneenlämpötilassa (+ 20 °C) on 10 bar ylipainetta laipan valmistusmateriaalista riippumatta (SFS-EN 1092-1:2018). Class-luokitelluissa laipoissa paineluokan nimessä esiintyvä painearvo ei suoraan ilmaise

laipan huoneenlämpötilan paineenkesto. Esimerkiksi Class 300 (300 psi eli noin 20,7 bar) laipan paineenkesto huoneenlämpötilassa vaihtelee välillä 16,5 bar – 51,7 bar, riippuen laipan valmistusmateriaalista (ASME B16.5:2003).

Materiaalin lujuus heikkenee lämpötilan funktiona ja tämä alentaa laippojen paineenkesto huoneenlämpötilaa korkeammissa lämpötiloissa. Laipan paineenkeston ja lämpötilan suhdetta kutsutaan laipan p/t-arvoksi. Lämpötilan vaikutus materiaalin lujuuden heikkenemiseen vaihtelee eri materiaalien välillä, joten laipoille ilmoitettavat p/t-arvot ovat materiaaliakohtaisia. Esimerkiksi koon DN 300 hiiliteräksestä P280GH valmistettu PN 10 laippa kestää lämpötilassa 300 °C painetta noin 8,8 bar, kun taas ruostumattomasta teräksestä 1.4307 valmistettu vastaava laippa kestää samassa lämpötilassa painetta vain 6 bar (SFS-EN 1092-1:2018). Paineenkeston aleneminen lämpötilan funktiona on aina huomioitava laippaliitoksia sisältäviä linjoja suunniteltaessa.

2.3 Tiivisteet

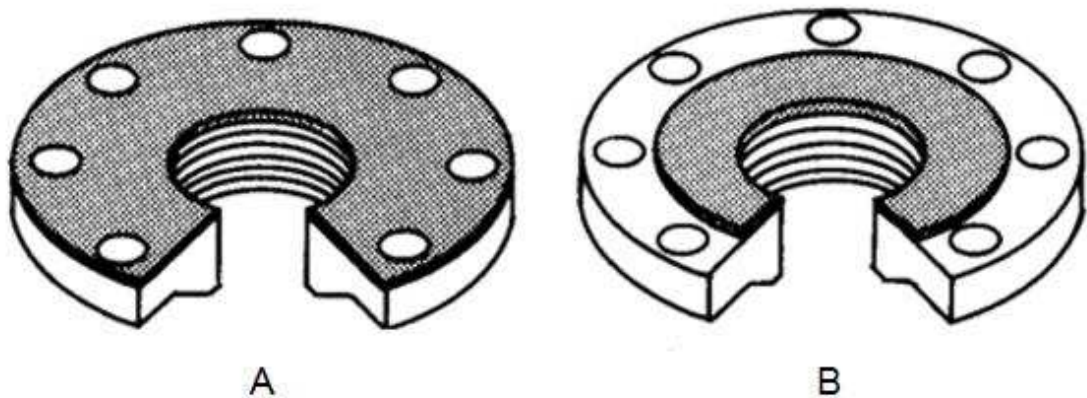
Laippaliitoksissa käytettäviä tiivisteitä valmistetaan useista eri materiaaleista. Yleisesti käytettäviä materiaaleja ovat muun muassa kumi, erilaiset kuidut (esimerkiksi hiilikuitu, lasikuitu ja aramidikuitu), PTFE (teflon), grafiitti, metallit (esimerkiksi alumiini, teräs, kupari ja messinki) sekä keraamiset aineet. (Pronk 2017) Rakenteellisesti tiiviste voi koostua yhdestä tai useammasta pääraaka-aineesta. Tiiviste voi olla esimerkiksi yksinomaan kuitumateriaalista valmistettu tai koostua pääosin grafiitista, jonka sisällä on metallivahvikelevy. Esimerkki tällaisesta kahden eri materiaalin muodostamasta tiivisterrakenteesta on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Tiiviste, joka koostuu kahdesta materiaalista, metallisesta vahvikelevystä (A) ja ei-metallista tiivistearineesta (B) (FSA Gasket Handbook 2017).

Edellä mainittujen lisäksi tiivisteitä valmistetaan muun muassa metallipinnoitettuna (esimerkiksi grafiittisidoksella), täysmetallisina tai niin kutsuttuina spiraalikudostiivisteinä tai kampatiivisteinä. Kaksi viimeisimpänä mainittua tiivistettä soveltuvat rakenteensa puolesta hyvin kohteisiin, joissa liitokseen kohdistuu korkea painekuormitus. Tiivistettä valittaessa onkin otettava huomioon, että sen on kestävä sekä liitokseen kohdistuva paine ja lämpötila että oltava kemiallisesti yhteensopiva virtaavan aineen kanssa. Tiiviste on yhtä vahva kuin sen heikoin lenkki, joten mainittu yhteensopivuus koskee myös tiivisteessä mahdollisesti käytettäviä sidos- ja täyteaineita. Edellä mainittujen lisäksi myös laipan rakenne on huomioitava tiivistettä valittaessa. Rajoittaviksi tekijöiksi saattavat muodostua laippojen tiivistepinnan muoto, laippojen jäykkyys tai ruuvien lukumäärä. Esimerkiksi ruuvijaoltaan harvan ja jäykkyydeltään heikkojen laippojen muodostamaan liitokseen ei kannata valita tiivistettä, joka vaatii suuren pintapaineen. (Pronk 2017) Ohjeita oikeanlaisen tiivisteiden valintaan antaa muun muassa standardi PSK 6401:2012.

Rakenteensa ja valmistusmateriaalinsa lisäksi tasotiivisteet voidaan jaotella myös sen mukaan, ulottuvatko ne ruuviympyrän ulkopuolelle (täysleveä tiiviste) vai rajoittuvatko ne ruuviympyrän sisäpuoliselle alueelle (kapea tiiviste). Nämä kaksi tiivistetyyppiä on esitetty kuvassa 8. Tiivisteiden ulottuessa ruuviympyrän ulkopuolelle on tiivisteissä oltava reiät ruuveja varten. Tämä auttaa tiivisteiden aseointia oikealle paikalleen, mutta vaatii toisaalta liitoksen kaikkien kiinnitysruuvien avaamisen tiivistettä vaihdettaessa. Ruuviympyrän ulkopuolelle ulottuvia tiivisteitä käytetään yleensä laippaliitoksissa, joissa tiivistepinta on tasainen. Tämän tyyppin tiivisteitä ei juurikaan käytetä prosessiteollisuudessa. Sen käyttö on kuitenkin suositeltavaa esimerkiksi tapauksissa, joissa toisiinsa liitettävien laippojen kovuus eroaa huomattavasti toisistaan (esimerkiksi teräslaippa liitetään valurautaiseen laippaan) tai jos laipat on valmistettu muovista (Mohinder 1999).



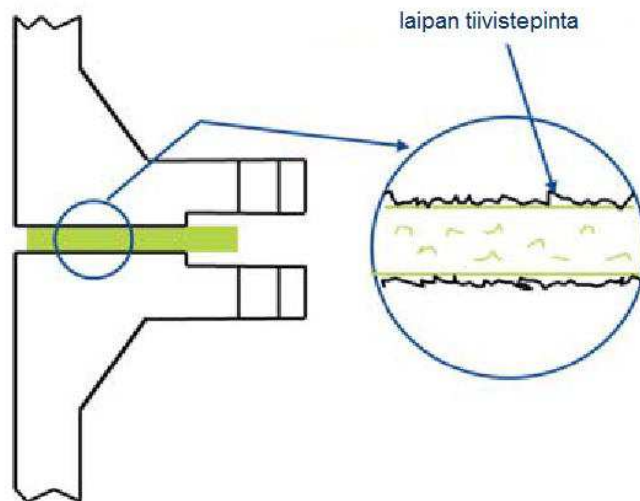
Kuva 8. Tiiviste ulottuu ruuviympyrän ulkopuolelle (A) tai rajoittuu ruuviympyrän sisäpuoliselle alueelle (B) (HardHat Engineer).

Kuvan 8 tyyppin B mukaisia, kokonaan ruuviympyrän sisäpuolella sijaitsevia, tiivisteitä on vaikeampaa asettaa keskelle liitosta. Tiivisteiden ulkohalkaisijan suuruus sovitetaankin standardeissa usein sellaiseksi, että se on lähellä kiinnitysruuvien sisäkehää. Näin ruuvit toimivat tiivisteiden keskittämistä auttavana tekijänä. Tiivisteessä voi myös sen tyyppistä riippuen olla ulkopuolinen ohjausrengas. Ruuviympyrän sisäpuolella sijaitsevia tiivisteitä käytetään yleensä laippaliitoksissa, joissa tiivistepinta on korotettu. Kapea tiiviste on myös yleinen teollisuuslaitoksissa käytettävä tiivistetyyppi, ja molemmat tässä työssä käsiteltävät laskentastandardit kattavat vain ruuviympyrän sisäpuolella olevat tiivisteet.

3 Laippaliitoksen tiiviys

Tiiviin laippaliitoksen edellytyksenä on, että tiiviste asettuu tiukasti laippojen pintoja vasten. Laippaliitoksen tiivistepinnat eivät ole täysin tasaisia, vaan niissä on aina jonkin verran epätasaisuutta (kuva 9). Tiivisteeseen onkin täytettävä näistä epätasaisuuksista johtuvat kolot ja raot muodostaakseen fyysisen esteen putkessa olevalle virtaavalle aineelle. Jotta tiiviste muotoutuisi, on sitä puristettava kokoon. Tätä tiivisteeseen kohdistettavan puristuskorjauksen aikaansaamaa jännitystilaa kutsutaan tiivisteeseen pintapaineeksi. Jotta tiivisteeseen aikaansaatu pintapaine olisi mahdollisimman tasainen, on tiivisteeseen asetettava oikein laippojen väliin. Tämä vaatii sekä riittävän tasomaisia että yhdensuuntaisia tiivistepintoja, mikä vuorostaan edellyttää laippaliitoksen asentajilta huolellista asennustyötä.

Liian suuret epätasaisuudet tai esimerkiksi laipan säteen suunnassa olevat naarmut laippojen tiivistepinnoissa saattavat riittävästä pintapaineesta huolimatta jättää avonaisia vuotoreittejä tiivisteeseen ja laipan välille. Tiivistepintojen halutaan kuitenkin harvemmin olevan täysin sileitä. Hieman karhea tiivistepinta estää tiivistettä pullistumasta pois paikoiltaan sisäisen paineen vaikutuksesta ja vähentää tiivisteeseen virumista. Haluttu pinnan karheustaso riippuu tiivisteestä tyypistä ja materiaalista, esimerkiksi metalliset tiivisteet vaativat huomattavasti sileämpiä pintoja kuin pehmeämmästä materiaalista valmistetut tiivisteet. (Kasprzyk 2013)



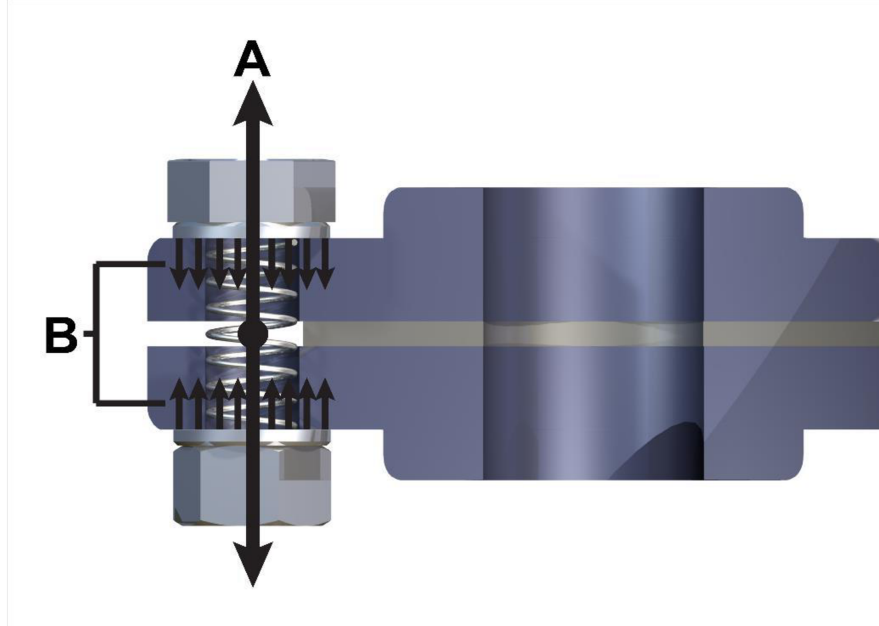
Kuva 9. Muotoutuessaan tiiviste täyttää laippojen tiivistepinnoissa olevat epätasaisuudet (Will 2015).

Pintapaineen täytyy pysyä liitoksen kannalta oikealla tasolla: liian pieni pintapaine johtaa vuotavaan liitokseen, liian suuri pintapaine voi vaurioittaa tiivistettä, jolloin se ei enää tiivistä liitosta. Pintapaine ei siis saa ylittää tiivisteeseen suurinta sallittua pintapainetta eikä alittaa tiivisteeseen pienintä vaadittua pintapainetta missään liitoksen käyttötilanteessa koko sen käyttöiän aikana. (FSA Gasket Handbook 2017)

3.1 Pintapaineen muodostaminen

Tiivisteeseen kohdistettava pintapaine saadaan aikaan kiinnitysruuvien avulla. Ruuveja kiristetään, jotta niihin saadaan vetojännitystilaa. Vetojännityksen alaiseen ruuviin syntyy venymä, jolloin ruuvi pyrkii kuormituksen jälkeen palaamaan alkuperäiseen pituuteensa

kiinnitysmutterin estäessä palaamisen. Tästä tilanteesta syntyvä vastavoima puristaa laippoja yhteen. Laippaliitoksen osia voikin ajatella kuvan 10 mukaisesti jousina: jousena toimivan ruuvin (A) venymisestä aiheutuvan voiman vastavoima (B) puristaa toista joustaa (laipat) kasaan. Voima välittyy laippojen kautta puristavaksi kuormaksi laippojen välissä olevaan tiivisteseen. Joustavana elementtinä myös tiivistettä voidaan ajatella jousena. Tätä ruuviin (ja siten myös laippaan ja tiivisteseen) kohdistuvaa voimaa kutsutaan yleisesti esikiristysvoimaksi. (Bickford 1990)



Kuva 10. A= Ruuvi (jousi) venyy; B= vastakkainen voima puristaa laippoja (jousi) yhteen (FSA Gasket Handbook 2017)

Pysyttäessä ruuvin myötörajan alapuolella voidaan ruuviin syntyvän jännityksen ja venymän yhteyden katsoa olevan lineaarinen

$$\sigma = E_b \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

jossa E_b on ruuvimateriaalin kimmokerroin, ε on ruuvin venymä ja σ on ruuviin syntyvä vetojännitys. Jännityksen avulla voidaan laskea ruuvivoima

$$F_b = \sigma \cdot A_b, \quad (2)$$

jossa A_b on ruuvin kierteitetyn osan pienin poikkipinta-ala.

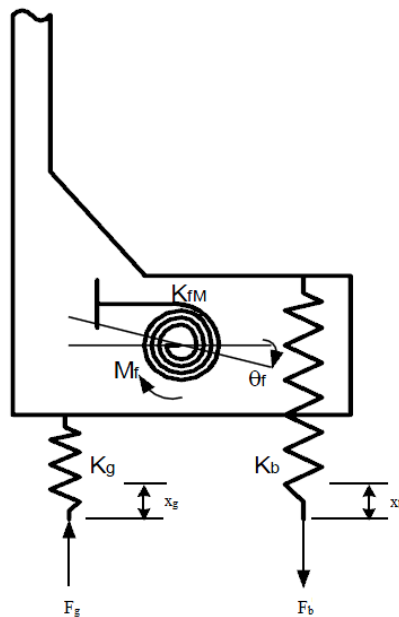
Vetojännitys voidaan toteuttaa kohdistamalla ruuviin vetoa ja kiinnittämällä mutteri siinä vaiheessa, kun haluttu venymä on saavutettu. Toinen huomattavasti yleisempi tapa on kiristää ruuvi-mutteriyhdistelmä ennalta määrättyyn momenttiin, jolloin ruuvi venyy kiertyessään mutteria vasten. Tämä kuormitustapa aiheuttaa ruuviin ja mutteriin vetojännityksen lisäksi myös leikkausjännitystä. Ruuvien kuormittaminen pelkästään vetokuormituksella mahdollistaa suhteellisen tarkan ruuvivoiman määrittämisen, momentin avulla venytettyyn ruuviin aikaansaatu ruuvivoima on huomattavasti epätarkempi suure. Tämä johtuu muun muassa siitä, että momenttityökalut eivät välttämättä ole aina kovin tarkkoja ja että suurin osa momentista kuluu kitkan voittamiseen.

Voitettavan kitkan suuruuteen vaikuttavat useat eri tekijät, muun muassa kiinnitysosien (ruuvi ja mutteri) materiaalit ja toleranssit, pintakäsittely, kierretyyppi ja kiinnitysosien

välissä käytetty voiteluaine ja sen määrä. Myös laippojen mahdollinen epäkeskeisyys asennustilanteessa sekä laippojen välissä oleva tiiviste aiheuttavat vastusta. Yleisesti arvioidaan, että vain noin 10 % kiristysmomentista siirtyy ruuvivoimaksi. Monesta tekijästä johtuen kitkan määrittäminen on haastavaa ja sen suuruus vaihtelee saman liitoksen eri ruuvien välillä. Siinä missä yhden ruuvin kohdalla välittyvä voima on 10 % saattaa se toisen ruuvin kohdalla olla 15 %. Tämä johtaa epätasaiseen puristusvoimaan (ja pintapaineeseen) moniruuvisessa laippaliitoksessa. (Bickford 1990)

3.2 Laippaliitoksen joustavuus

Edellisessä luvussa esitettiin, että laippaliitoksen komponentteja voidaan ajatella jousina ja että ruuvien venyttämisellä aikaansaatua voima välitetään tiivisteeseen laippojen kautta. Välittyvän voiman suuruuteen vaikuttaa liitoksen kokonaisjoustavuus. Liitoksen komponenttien voidaan katsoa käyttäytyvän kuten sarjassa olevat jouset, jolloin liitoksen kokonaisjoustavuus voidaan määrittellä sen yksittäisten komponenttien joustavuuden perusteella. Laippaliitoksen joustavuutta sekä liitoksen osiin vaikuttavia voimia on havainnollistettu kuvassa 11. Ruuvivoiman F_b avulla välitetään tiivisteeseen riittävän pintapaineen muodostamiseksi tarvittava voima F_g . Välittyvän voiman suuruuteen vaikuttavat ruuvin jousivakio K_b , laipan jousivakio K_{fM} sekä tiivisteiden jousivakio K_g .



Kuva 11. Laippaliitoksen osien jousivakiot K_b (ruuvi), K_{fM} (laippa) ja K_g (tiiviste) sekä liitokseen kohdistuva ruuvivoima F_b , ruuvivoimasta aiheutuva momentti M_f sekä tiivistevaima F_g . Kuvassa näkyvät myös ruuvin venymä x_b , momentista syntyvä kiertymä θ_f sekä tiivisteiden puristuma x_g . (Bouid & Beghou 2003, alkuperäistä kuvaa on muokattu)

Ruuvin jousivakio K_b voidaan määrittää kaavasta

$$K_b = \frac{E_b \cdot A_b}{L_b}, \quad (3)$$

jossa E_b on ruuvin kimmokerroin, A_b on ruuvin kierteitetyn osan pienin poikkipinta-ala ja L_b on ruuvin joustopituus (ruuvin kannan ja mutterin välisen osan pituus). Ruuvi joustaa aksiaalisesti, joten ruuviin kohdistuvan voiman ja ruuvin venymän suhde noudattavat kaavaa

$$F_b = K_b \cdot x_b , \quad (4)$$

jossa F_b on ruuvivoima ja x_b on ruuvin pituuden muutos. Ruuvin pituuden muutoksen katsotaan olevan positiivinen silloin, kun ruuvi pitenee. Tiivisteen jousivakio K_g voidaan määrittää kaavasta

$$K_g = \frac{E_g \cdot A_g}{t_g} , \quad (5)$$

jossa E_g on tiivisteen kimmokerroin, A_g on tiivisteen pinta-ala ja t_g on tiivisteen paksuus. Myös tiiviste joustaa aksiaalisesti, joten tiivisteeseen kohdistuvan voiman ja tiivisteen puristuman suhde noudattavat kaavaa

$$F_g = K_g \cdot x_g , \quad (6)$$

jossa F_g on tiivisteeseen kohdistuva voima ja x_g on tiivisteen paksuuden muutos. Tiivisteen paksuuden muutoksen katsotaan olevan positiivinen silloin, kun tiiviste puristuu kaasaan.

Laipan kiertojoustavuus K_{fM} on riippuvainen laipan rakenteesta ja sen mittasuhteista, joten laipan jousivakion määrittelemineen on edellä mainittuja jousivakiota monimutkaisempaa. Standardin GOST R 52857.4:2007 mukaan laipan kiertojoustavuus K_{fM} voidaan määrittää kaavasta

$$K_{fM} = \frac{E_f \cdot S_o^2 \cdot L}{(1-\nu^2) \cdot B} , \quad (7)$$

jossa E_f on laippamateriaalin kimmokerroin, S_o on laipan kauluksen ohuimman osan paksuus, L on laipan mitoista riippuva kerroin, ν on Poissonin vakio ja B on laipan kauluksen mittasuhteista riippuva kerroin.

Laippaan kohdistuvan momentin ja siitä aiheutuvan kiertymän suhde noudattavat kaavaa

$$K_{fM} = \frac{M_f}{\theta_f} , \quad (8)$$

jossa M_f on laippaan kohdistuva momentti ja θ_f on laipan kiertymä [rad].

Liitoksen kokonaisjousivakion määrittelemiseksi on määriteltävä laipan aksiaalinen jousivakio K_f , tämä voidaan tehdä laipan aksiaalisen joustavuuden ja kiertojoustavuuden suhteen avulla. Laippa on varsin jäykkä kappale, jolloin siihen kohdistuvan momentin aiheuttama kiertymä on pieni. Tällöin kiertymän ja siirtymän yhteys noudattavat kaavaa

$$\theta_f = \frac{x_f}{a} , \quad (9)$$

jossa x_f on kiertymästä aiheutuva aksiaalinen siirtymä ja a on ruuvivoiman momenttivarssi (ruuvivoiman vaikutussuoran etäisyys laipan ja tiivisteen välisestä kontaktikohdasta). Laippaan kohdistuva momentti on ruuvivoiman F_b ja momenttivarren a tulo. Laipan aksiaalisen joustavuuden ja kiertojoustavuuden suhde on tällöin

$$\frac{K_f}{K_{fM}} = \frac{F_b \cdot \theta_f}{x_f \cdot M_f} = \frac{F_b \cdot x_f}{x_f \cdot F_b \cdot a^2} = \frac{1}{a^2} , \quad (10)$$

jolloin laipan aksiaaliseksi jousivakioksi saadaan

$$K_f = \frac{K_{fM}}{a^2}. \quad (11)$$

Tämän jälkeen liitoksen kokonaisjousivakio K_{TOT} voidaan määritellä kaavalla

$$\frac{1}{K_{TOT}} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_g} = \frac{1}{K_b} + \frac{a^2}{K_{fM}} + \frac{1}{K_g}. \quad (12)$$

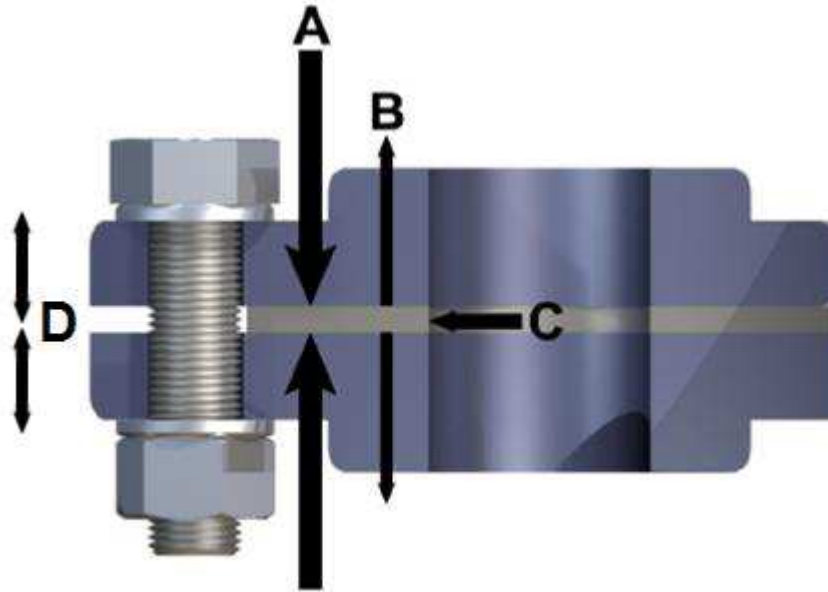
Tämä kokonaisjousivakio on yksinkertaistettu siltä osin, että ruuvien joustavuudessa ei ole huomioitu mutterin ja mahdollisesti käytettävien aluslevyjen joustavuutta. Ruuvien, aluslevyn ja mutterin voidaan katsoa toimivan sarjassa olevina jousina, jolloin niiden kokonaisjoustavuus voidaan määritellä niiden osien joustavuuden perusteella kaavassa 12 esitetyllä tavalla.

Sarjassa toimivien jousien kokonaisjousivakio on aina pienempi kuin pienimmän yksittäisen siinä vaikuttavan jousen jousivakio. Näin ollen liitoksen joustavin komponentti muodostuu määrääväksi laippaliitoksen kokonaisjoustavuuden kannalta. Tiivisteellä on laippaliitoksen komponenteista melkein aina liitoksen muita osia pienempi kimmokerroin, mutta varsinkin pinta-alaltaan isojen ja paksuudeltaan ohuiden tiivisteiden jousivakio voi kuitenkin olla suuri. Tiiviste ei siis automaattisesti ole laippaliitoksen joustavin komponentti.

Edellä esitetyssä esitystavassa on liitoksen kaikkien komponenttien ajateltu käyttäytyvän lineaariselastisesti. Ruuvien ja laippojen jousivakioiden voidaankin ajatella olevan lineaarisia, mutta tiivisteiden jousivakioon tämä oletamus ei päde. Tiivisteiden kimmokerroin riippuu siihen kohdistuvasta kuormituksesta, jolloin tiivisteiden jousivakio on ennemminkin siihen kohdistuvan kuormituksen funktio kuin jokin yksittäinen luku. Tiiviste käyttäytyy myös liitoksen muista komponenteista poiketen elastisplastisesti jo alhaisillakin kuormitustasoilla. Tiivistettä kuormitettaessa aiheutuu siihen aina jonkin verran plastista muodonmuutosta, jonka seurauksena tiiviste ei palaa kuormituksen poistuttua enää täysin alkuperäiseen kuormittamattomaan tilaansa. Näistä syistä tiivisteiden vaikutusta laippaliitokseen on vaikea analysoida. (Bickford 1990)

3.3 Pintapaineen muuttuminen käytön aikana

Asennuksen yhteydessä saavutettu pintapaine ei säily muuttumattomana liitoksen käytön aikana. Pintapainetta muuttavat niin liitokseen kohdistuvat voimat kuin liitoksen lämpötilan aikaansaamat muutokset liitososissa. (Abid & Khan 2010) Eräitä laippaliitokseen kohdistuvia voimia on esitetty kuvassa 12. Esikiristytyn aikaansaama puristava voima (A) tuottaa laippojen välissä sijaitsevaan tiivisteeseen pintapaineen. Tätä pintapainetta voi alentaa sisäisestä paineesta aiheutuva voima (B), joka pyrkii työntämään laippoja irti toisistaan. Sisäinen paine pyrkii myös työntämään tiivistettä pois paikoiltaan (C). Osien erisuuruudesta lämpölaajenemisesta aiheutuvat voimat (D) voivat joko alentaa tai kasvattaa pintapainetta. Pintapaine alenee, jos ruuvit laajenevat laippoja enemmän. Tällöin liitos löystyy ja tiivisteeseen kohdistuva puristusvoima pienenee. Päinvastainen tilanne kasvat-
taa pintapainetta, ruuvien estäessä laippojen lämpölaajenemisen puristuu tiiviste enemmän kasaan.



Kuva 12. Laippaliitokseen vaikuttaa useita voimia, kuten esimerkiksi esikiristytyn aikaansaama laippoja yhteen painava voima (A), sisäisestä paineesta aiheutuva liitosta avaava voima (B), sisäisestä paineesta aiheutuva tiivistettä pois paikoiltaan työntävä voima (C) ja osien mahdollisesta erisuuruudesta lämpölaajenemisesta aiheutuvat voimat (D) (Labre 2014, alkuperäistä kuvaa on muokattu).

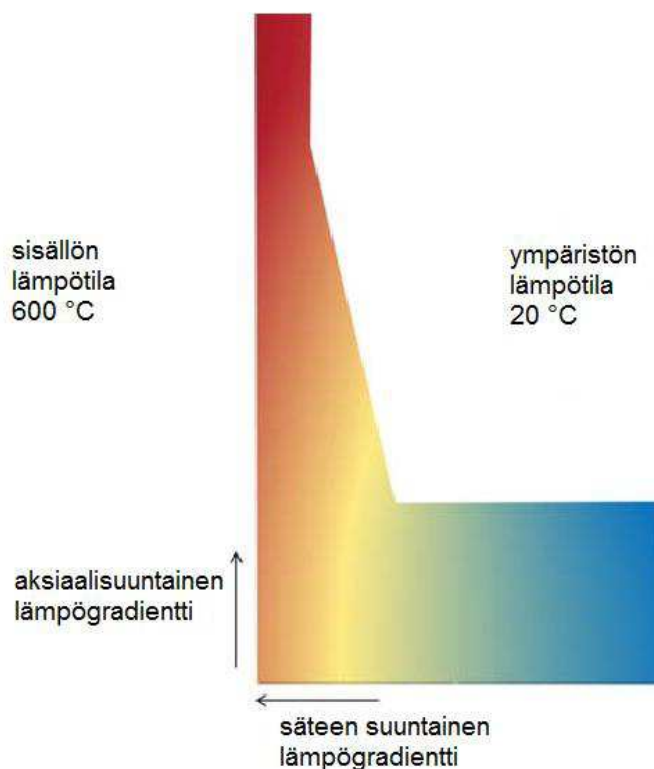
Laippaliitoksen ollessa osa putkistoa rasittavat sitä edellä mainittujen kuormitusten lisäksi putkistosta aiheutuvat kuormitukset. Muun muassa putkiston lämpölaajeneminen voi kohdistaa laippaliitokseen aksiaali- ja leikkausvoimia sekä taivutus- ja vääntömomenttia. Laippaliitokseen kohdistuvat voimat ja momentit saattavat aiheuttaa laippojen kiertymistä. Tämän ilmiön vaikutusta pintapaineen suuruuteen on käsitelty tarkemmin seuraavassa luvussa.

Liitoksen huoneenlämpöä korkeampi lämpötila vaikuttaa ruuvivoiman suuruuteen alentavasti. Ruuvin kimmokerroin pienenee lämpötilan noustessa tehden ruuvista joustavamman. Alkuperäisen esikiristysvoiman ja korkeammassa lämpötilassa olevan ruuvivoiman suhde voidaan arvioida kaavasta

$$F_b^T = F_b^A \cdot \frac{E_{b2}}{E_b}, \quad (13)$$

jossa F_b^T on ruuvivoima korkeammassa lämpötilassa, F_b^A on esikiristysvoima, E_{b2} on ruuvin kimmokerroin korkeammassa lämpötilassa ja E_b on ruuvin kimmokerroin huoneenlämpötilassa. Korkea lämpötila voi myös aiheuttaa ruuvissa jännitysrelaksaatiota, jolloin ruuviin aikaansaatua vetojännitystä pienenee. Pienempi vetojännitys tarkoittaa pienempää ruuvivoimaa. Koska ruuvivoiman suuruudella on suora yhteys tiivisteen kuormitustason, alentavat molemmat edellä esitetyt ilmiöt tiivisteseen kohdistuvaa pintapainetta. (Bickford 1990)

Lämpölaajenemisen aiheuttamat muutokset pintapaineeseen eivät rajoitu pelkästään tapauksiin, joissa liitososien lämpölaajenemiskertoimet eroavat merkittävästi toisistaan. Laippa toimii geometriansa puolesta jäädytysrivan tavoin: liitoksen virtaavan aineen kanssa kosketuksissa olevan lämpimän sisäpinnan ja viileämmän ulkopinnan välille syntyy sekä aksiaalisuuntainen että säteen suuntainen lämpögradientti kuvan 13 mukaisesti.



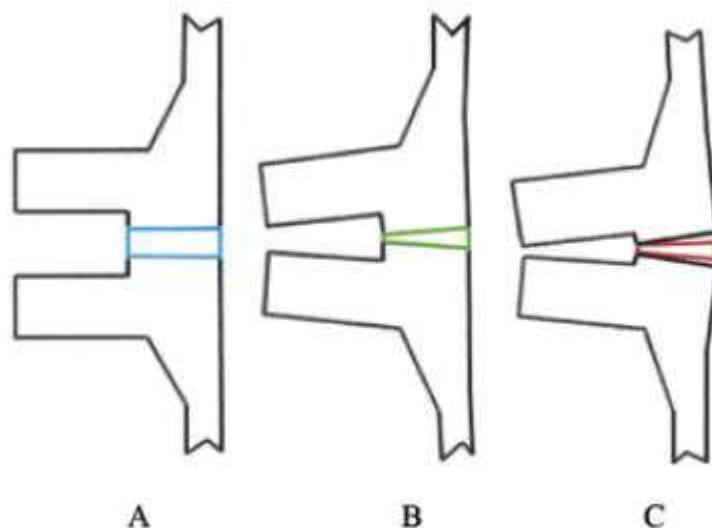
Kuva 13. Laipan lämpimän sisäpinnan ja viileän ulkopinnan välille syntyvät lämpögradientit (Labre 2014).

Säteen suuntainen lämpögradientti aiheuttaa sen, että laipan lämpimämpi sisäreuna laajenee aksiaalisuunnassa laipan ulkoreunaa ja siellä sijaitsevia ruuveja enemmän. Tämä kasvattaa tiivisteen pintapainetta. Aksiaalisuuntainen lämpögradientti aiheuttaa vuorostaan sen, että liittyvä putki ja laipan ohuempi yläosa laajenevat säteen suunnassa suhteessa enemmän kuin itse laippaosa. Tämä aiheuttaa laipan kiertymistä ja sen seurauksena tiivisteen pintapaineen muuttumista (Labre 2014). Yleensä kuumat putkilinjat eristetään, laippaliitokset mukaan lukien, joten lämpögradientin vaikutus ei nouse kovin merkittäväksi.

Pintapaineeseen vaikuttavat myös tiivisteen ominaisuudet, jotka voivat muuttua sekä ajan että lämpötilan funktiona. Tiivisteen ominaisuuksiin vaikuttavia ilmiöitä ovat esimerkiksi tiivisteen viruminen sekä relaksoituminen. Virumisilmiö aikaansaa tiivisteen ohentumista kuormituksen alaisena, mikä muuttaa tiivisteen kimmokerrointa ja tätä kautta pintapainetta. Relaksoituminen aiheuttaa kuormitetun tiivisteen jännitystilän alenemisen. Sekä viruminen että relaksaatio ovat hitaasti ajan kuluessa esiintyviä ilmiöitä, jotka voimistuvat korkeammissa lämpötiloissa. Tiivistemateriaalien välillä on eroja. Jotkin tiivistemateriaalit ovat herkempiä virumiselle, kun toiset taas ovat herkempiä relaksaatiolle. Lämpötila muuttaa myös tiivisteen mekaanisia ominaisuuksia kuten esimerkiksi tiivistysominaisuuksia, elastista palautumista puristuskuormituksesta ja suurinta sallittua puristusjännitystä. (Labre 2014)

3.4 Laippojen kiertyminen

Laippojen kiertyminen aiheuttaa tiivisteeseen epätasaisen jännitystilän. Tiivisteiden sisäreuna voi menettää kontaktin laippaan samalla kuin tiivisteiden ulkoreuna painuu voimakkaasti kasaan. Kontaktipinta-alan pientyessä tiivisteeseen kohdistuva puristusjännitys kasvaa, vaikka puristusvoima pysyisi samana. Kiertyminen voi aiheutua esimerkiksi liian suuresta esikiristysvoimasta (kuva 14).



Kuva 14. Laippaliitoksen kiertyminen asennustilanteessa ennen ruuvien kiristämistä (A), asennustilanteessa kun esikiristysvoima on oikean suuruinen (B) ja asennustilanteessa kun esikiristysvoima on liian suuri (C) (Labre 2014).

Ruuvien esikiristytksen ohella vastaavanlaiseen tilanteeseen johtavat myös sisäisen paineen pyrkimys irrottaa laippoja toisistaan sekä liitoksen lämpötilasta johtuvat muodonmuutokset. Liitosta voi pyrkiä avaamaan myös ulkoinen aksiaalivoima tai taivutusmomentti. Näistä kahdesta kuormituslajista taivutusmomentti on laippaliitoksen kannalta kriittisempi. Tämä johtuu siitä, että tiiviste saattaa tällöin puristua laippaliitoksen toisella reunalla kasaan ja vastakkaisella reunalla menettää kosketuksensa laippaan. Molemmat ilmiöt voivat johtaa vuotavaan liitokseen. Edellä esitetyt kuormitukset voivat joko itsessään aiheuttaa laippojen kiertymistä tai kasvattaa jo asennustilanteessa aiheutunutta kiertymää. Laippojen kiertymisen takia tiivisteeseen voi kohdistua huomattavasti suurempi puristusjännitys kuin mitä esikiristysvoiman perusteella on oletettavissa. Tämä voi johtaa tiivisteiden vaurioitumiseen. (Bickford 1990)

Laippojen taipumus kiertyä kuormituksen alaisena riippuu niiden kiertojäykkyydestä, joka vaihtelee eri rakenteiden välillä. Tässä työssä esitetyistä laippatyypeistä kauluslaippa on kiertojäykin irtolaippa-kaulusrakenteen kiertyessä helpoimmin. Kauluslaipan kiertojäykkyys onkin yksi syy, miksi se soveltuu käytettäväksi kohteisiin, joissa sisäinen paine on korkea.

3.5 Laippaliitoksen vioittuminen

Laippaliitos voi vioittua useasta eri syystä: mutterin kiristys voi löystyä, ruuvi tai mutteri rikkoutua, tiiviste vaurioitua tai laippa vääntyä. Vioittuminen voi johtua esimerkiksi ym-

päristön olosuhteista, kuten ruostumisesta. Sen aiheuttajana voi olla myös liitoksen kuormitustila, tällaisia ovat esimerkiksi väsyttävästä tai värähtelevästä kuormituksesta aiheutuneet ruuvivauriot. Tietty vauriomuodot ovat tyypillisempiä eri teollisuuden aloilla. Esimerkiksi teollisuuslaitoksissa suurin huomio kiinnitetään yleensä liitoksen tiiviyyteen ja korroosion vaikutukseen, kun taas väsyttävää kuormitusta tarvitsee harvemmin ottaa huomioon. (Bickford 1990)

Esikiristysvoiman suuruus vaikuttaa suoraan tai välillisesti useaan laippaliitoksen vioittumistapaan. Ruuvien lujuuteen nähden ylimitoitettu esikiristysvoima voi johtaa ruuvien pysyvään plastiseen muodonmuutokseen, tai jopa ruuvien katkeamiseen. Liian suuri esikiristysvoima saattaa myös vaurioittaa laippoja tai tiivistettä. Sekä laippojen lujuus että tiivisteen kuormituksen kesto alenevat korkeammassa lämpötiloissa. On siis huomioitava, että vaikka esikiristysvoima ei ylittäisi laippojen tai tiivisteen tai molempien sallittua kuormitustasoa asennustilanteessa, voi tämä kuormitustaso olla liian suuri liitoksen käyttölämpötilassa. Suuri esikiristysvoima tarkoittaa myös korkeampia jännitustasoja, jolloin jännityskorroosiolle altistava kynnysjännitys saattaa ylittyä (Lund Jepsen & Grumsen 2014).

Vaadittavaan pintapaineeseen nähden liian alhainen esikiristysvoima ei purista tiivistettä riittävästi kasaan, jolloin liitos ei ole tiivis. Tapauksissa, jossa virtaava aine on korrodoivaa, voi liian löysä liitos mahdollistaa sisällön vuotamisen tiivisteen ohitse ja aiheuttaa ruuvien ruostumista. Liian alhainen esikiristysvoima johtaa myös löysään liitokseen, jolloin liitoksen osat pääsevät liikkumaan toisiinsa nähden. Tämän seurauksena ruuveihin kohdistuu leikkausvoimia. Ruuvi voi myös virua korkeammassa lämpötiloissa, jolloin se ajan kuluessa venyy kuormituksen alaisena. Riittävästi venyessään ruuvien poikkipinta-ala pienenee siihen pisteeseen, että se ei enää kestä siihen kohdistettua kuormitusta, jolloin ruuvi katkeaa. (Bickford 1990)

Laippaliitosta on aina ajateltava kokonaisuutena. Liitoksen osat on valittava siten, että ne soveltuvat liitokseen käyttöolosuhteita ajatellen. Tämän lisäksi on otettava huomioon liitoksen osien keskinäinen yhteensopivuus. Kun nämä ehdot täyttyvät, jää jäljelle vielä sopivan tasapainotilan löytäminen liitoksen osien kesken. Tällaisen voidaan katsoa löytyneen, kun sekä ruuveja että tiivistettä on kuormitettu riittävästi mutta ei liikaa ja laippa kestää siihen kohdistuvan kuormituksen kiertymättä liiallisesti tai vioittumatta. Liitoksen esikiristysvoimaa ei pidä ajatella sen pienimpänä tarvittavana esikiristysvoimana, vaan lähtökohtana. Liitoksen käyttäytymisen tarkka kuvaus on lähes mahdotonta, joten huolellisestikin määritelty esikiristysvoima on aina vain hyvä arvio. Tästä syystä liitosta on aiheellista kiristää tarvittavaa esikiristysvoimaa enemmän silloin, kun se on edellä kuvailun tasapainotilan puitteissa mahdollista. (Zeuss 2012)

4 Työssä käytettävät laskentastandardit

Standardiksi kutsutaan kansallista, kansainvälistä tai toimialakohtaista yhteistä ohjeistoa, joka käsittelee esimerkiksi jotain tuotetta tai toimintamenetelmää. Standardien avulla voidaan yhdenmukaistaa käytäntöjä ja suunnittelutapoja. Standardi julkaistaan aina kirjallisessa muodossa ja se on jonkin standardisoinnista huolehtivan viranomaisen, järjestön tai muun tunnustetun elimen hyväksymä. Standardien käyttö on tekniikan alalla hyvin laajalaista. Ne eivät itsessään ole lakeja, mutta viranomaiset saattavat edellyttää niiden käyttöä.

Suomessa standardisoinnin keskusjärjestönä toimii Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, joka on jäsenenä kansainvälisessä standardisoimisjärjestössä ISO:ssa (International Organization for Standardization) sekä eurooppalaisessa standardisoimisjärjestössä CEN:issä (European Committee for Standardization). SFS:n jäsenenä on elinkeinoelämän järjestöjä ja Suomen valtio. SFS:n toimialayhteisöjä ovat muun muassa Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry ja Muoviteollisuus ry. PSK Standardisointiyhdistys ry on kansallinen teollisuuden standardisointiorganisaatio ja SFS:n jäsen.

4.1 GOST R 52857.4:2007

GOST R 52857.4:2007 on venäläinen kansallinen standardi, joka esittää laskentamenetelmän laippaliitosten lujuus- ja tiiviystarkastelulle. Laskentastandardin rinnalla sovelletaan standardia GOST R 52857.1.

Laskentamenetelmä soveltuu käytettäväksi laippaliitoksille, jotka koostuvat päittäishitsatuista kauluslaipoista, hitsatuista levy-laipoista tai irtolaippa-kaulusrakenteista. Liitoksen laippojen ei tarvitse olla keskenään samanlaisia. Laipan vastalaippana voi toimia myös umpilaippa. Menetelmä soveltuu myös laippaliitoksille, joissa laippojen väliin on kiinnitetty jokin lisävaruste. Tiivistetyypeistä laskentamenetelmä kattaa ainoastaan ruuviympyrän sisäpuolella olevat tiivisteet. Laippaliitokseen kohdistuvista kuormituksista laskentamenetelmä huomioi virtaavan aineen sisäisen paineen, ulkoisen paineen sekä laippaliitokseen kohdistuvat ulkoiset kuormitukset (aksiaalivoima ja taivutusmomentti). Se huomioi myös laippojen ja ruuvien mahdollisesta erisuuruudesta lämpölaajenemisesta aiheutuvat kuormitukset.

Standardit GOST R 52857.4 ja GOST R 52857.1 korvattiin uusilla standardeilla 1.8.2018. Työssä käytettyjen GOST-standardien kumoaminen tuli tietoon työn ollessa jo suhteellisen pitkällä, mistä syystä työ päätettiin saattaa loppuun pohjautuen vanhoihin standardeihin. Laskentastandardiin tehdyt muutokset olivat luonteeltaan tarkennuksia ja pieniä korjauksia, jotka eivät kohdistuneet itse laskentamenetelmään (Gribov 2019).

4.2 SFS-EN 1591-1:2014

SFS-EN 1591-1:2014 on eurooppalainen standardi, joka esittää laskentamenetelmän laippaliitosten lujuus- ja tiiviystarkastelulle. Laskentastandardin rinnalla sovelletaan tarkoituksenmukaista suunnittelustandardia, kuten esimerkiksi standardia SFS-EN 13480-3 tai standardia SFS-EN 13445-3. Laskentamenetelmässä käytetyt tiivistearvot perustuvat

standardissa SFS-EN 13555 määriteltyjen tiivisteparametrien ja testien mukaisiin tiivistearvoihin.

Standardi SFS-EN 1591-1:2014 on sisällöltään ja kattavuudeltaan hyvin samankaltainen edellä esitellyn standardin GOST R 52857.4:2007 kanssa, soveltuen yhtä lailla käytettäväksi kahdesta samanlaisesta tai keskenään erilaisesta laipasta koostuvien laippaliitosten tarkastelemiseen. Standardissa esitetään tiettyjä tarkentavia vaatimuksia sen kattamien laippojen ja tiivisteiden suhteen. Laippojen on muun muassa oltava pyörähdysymmetrisiä, tiivisteiden geometrialtaan ympyrän muotoisia ja liitoksessa on oltava vähintään neljä identtistä tasajaolla olevaa ruuvia. Standardin kattamat laippatyypit ja tiivistetyypit ovat pääosin yhteneväisiä standardin GOST R 52857.4:2007 kanssa. Laippaliitokseen kohdistuvien kuormien osalta standardin SFS-EN 1591-1:2014 esittelemä menetelmä on hieman kattavampi: se huomioi virtaavan aineen sisäisen paineen, ulkoisen paineen, lämpölaajenemisesta aiheutuvien kuormitusten sekä laippaliitokseen kohdistuvan ulkoisen aksiaali-voiman ja taivutusmomentin lisäksi myös ulkoisen leikkausvoiman ja vääntömomentin. Laskentamenetelmä huomioi myös kiristystavasta johtuvan ruuvivoiman hajonnan.

4.3 Laskentastandardien yhtäläisyyksiä ja eroavaisuuksia

Edellisessä luvussa todettiin, että standardien esittämät laskentamenetelmät vastaavat kattavuudeltaan pääasiallisesti toisiaan laippatyyppien ja tiivistetyyppien osalta. Kumpikaan laskentamenetelmä ei ota huomioon laippojen tai ruuvien virumista, muuten kuin näiden osien suunnittelujännitysten kautta. Tiivisteiden taipumus virumiseen ja relaxoitumiseen otetaan molemmissa laskentamenetelmissä huomioon erillisen kertoimen avulla. Molemmat laskentamenetelmät huomioivat myös sen, kontrolloidaanko ruuvien kiristystä esimerkiksi käyttämällä momenttiavainta. Menettelyjen voidaan myös katsoa etenevän karkeasti ottaen samalla tavoin. Standardin GOST R 52857.4:2007 esittelemän laskentamenetelmän vaiheisiin perehdytään tarkemmin luvussa 5.4, jossa käydään läpi laskentaohjelmalla suoritettu laippatarkastelu.

Laskentamenetelmien käyttämät suunnittelujännitykset määritellään osin eri perustein. Standardia SFS-EN 1591-1:2014 käytettäessä määritellään laippojen ja liittyvän putken suunnittelujännitys sen rinnalla sovellettavan suunnittelustandardin mukaisesti. Ruuvien suunnittelujännitystä määriteltäessä sallitaan samojen varmuuskertoimien käyttö kuin laipan ja putken suunnittelujännityksiä määriteltäessä. Nämä varmuuskertoimet ovat pienemmät kuin ruuvimateriaaleille tavallisesti käytettävät varmuuskertoimet. Tämän lisäksi standardi SFS-EN 1591-1:2014 sallii asennustilanteessa käytettävän koeponnistustilanteen mukaisia suunnittelujännityksiä. Koska koeponnistustilanteen suunnittelujännitystä määriteltäessä käytetään pienempiä varmuuskertoimia kuin muille käyttötilanteille, johtaa tämä komponenttien suurempaan asennustilanteen suunnittelujännitykseen. Standardia GOST R 52857.4:2007 käytettäessä määritellään laippojen ja liittyvän putken suunnittelujännitys standardin GOST R 52857.1 mukaisesti, jonka määräytymisperusteet ovat suurelta osin yhteneväiset edellisessä luvussa mainittujen eurooppalaisten suunnittelustandardien kanssa. Ruuvien suunnittelujännitys määräytyy standardin GOST R 52857.4:2007 mukaisesti, tässä käytettävät varmuuskertoimet ovat suurempia kuin putki- ja laippamateriaaleille käytetyt. Nämä määrittelytapojen eroavaisuudet johtavat huomattaviin eroihin varsinkin ruuvien asennustilanteen suunnittelujännityksen osalta.

Merkittävin eroavaisuus laskentastandardien laskentaosuuksien välillä syntyy tavassa, miten tiivisteiden käyttäytyminen on otettu huomioon. Tiiviste vaikuttaa liitoksen kokonaisjoustavuuteen omalla jousivakiollaan luvussa 3.2 esitetyn mukaisesti. Itse jousivakioon vaikuttavat tiivisteiden kimmokerroin, pinta-ala ja tiivisteiden paksuus. Liitoksen joustavuuden johdosta tiiviste ei välttämättä kuormitu koko leveydeltään. Laskentaa varten määritelläänkin niin kutsuttu tiivisteiden tehollinen leveys, joka on usein tiivisteiden todellista leveyttä kapeampi. (Baylac & Koplewicz 2004) Tätä tehollista leveyttä käytetään sekä tiivisteiden jousivakiota että tiivisteiden kuormitettavaa pinta-alaa määriteltäessä. Pienempi tehollinen leveys johtaa esimerkiksi pienempään pinta-alaan, joka vuorostaan vaikuttaa tarvittavaan esikristisvoimaan alentavasti. Varsinkin leveiden tiivisteiden kohdalla todellisen leveyden perusteella määritelty esikristisvoima voisi johtaa tilanteeseen, jossa käytön aikana tiivisteeseen syntyvä jännitys kasvaisi liian suureksi sen todellisuudessa kuormittuvan kapeamman pinta-alan takia. Tiivisteiden tehollinen leveys vaikuttaa myös liitoksen voimatasapainoon, sillä liitokseen kohdistuvien kuormitusten momentti-avarret muuttuvat leveyden mukana. Standardissa GOST R 52857.4:2007 esitetty laskentamenetelmä määrittelee tiivisteiden tehollisen leveyden tietyssä suhteena sen todelliseen leveyteen, tämä suhde riippuu tiivisteiden koosta ja tiivistetyypistä. Toisin sanoen, tiivisteiden tehollinen leveys ei ole millään lailla riippuvainen liitoksen joustavuudesta. Standardin SFS-EN 1591-1:2014 esittelemässä laskentatavassa tiivisteiden tehollisen leveyden määrittely on iteratiivinen prosessi. Iterointi aloitetaan määrittelemällä tiivisteeseen kohdistuva kuormitus tilanteessa, jossa tiivisteiden leveys vastaa sen todellista leveyttä ja kuormituksen aiheuttama voima on vapaasti valittu. Tämän jälkeen tarkistetaan, vastaako laskennan lähtötietoihin syötetty tiivisteiden kimmokertoimen arvo määritellyn kuormitustason mukaista arvoa. Kimmokertoimen arvo korjataan tarvittaessa, jolloin myös liitoksen kokonaisjoustavuus muuttuu. Tämä johtaa vuorostaan usein tiivisteiden leveyden ja sen myötä myös tiivisteeseen kohdistuvan kuormituksen muuttumiseen. Tätä iterointia jatketaan, kunnes se suppenee. Iteroinnin tuloksena saavutetun tiivisteiden kuormitustason on oltava vähintään pienimmän vaaditun pintapaineen suuruinen. Molemmat standardit määrittelevät tiivisteiden tehollisen leveyden vain kerran. Standardi SFS-EN 1591-1:2014 olettaa tämän leveyden pysyvän samana kaikissa kuormitustapauksissa. Standardi GOST R 52857.4:2007 käyttää puolta määritellystä tehollisesta leveydestä asennustilanteen edellyttämää tiivistevoimaa määritellään ja tehollista leveyttä sellaisenaan muiden kuormitustilanteiden tiivistevoimia määritellään.

Toinen, myöskin tiivisteisiin liittyvä, eroavaisuus on laippaliitokselle määritellyn tiiviysluokan huomioiminen laskennassa. Standardin SFS-EN 1591-1:2014 laskentamenetelmän käyttämät, standardin SFS-EN 13555 mukaan määritellyt, eri kuormitustilanteissa vaaditut pienimmät pintapaineet ovat sekä tiiviysluokan että liitokseen vaikuttavan sisäisen paineen funktioita. Standardin GOST R 52857.4:2007 laskentamenetelmän käyttämät tiivisteparametrit eivät ole tiiviysluokasta tai paineesta riippuvaisia, joten niillä suoritettujen laskennan perusteella ei voida ottaa kantaa liitokselle mahdollisesti määritellyn tiiviysluokan vaatimusten täyttymiseen. Standardin SFS-EN 1591-1:2014 informatiivisessa liitteessä I on esitetty vaihtoehtoisia tiivisteparametrejä käytettäväksi tapauksille, joissa tiiviysluokalle ei ole annettu vaatimuksia. Nämä tiivisteparametrit ovat yhteneväisiä standardissa GOST R 52857.4:2007 käytettävien tiivisteparametrien kanssa.

Standardin GOST R 52857.4:2007 esittelemän laskentamenetelmän käyttämät tiivisteparametrit eroavat osittain standardin SFS-EN 1591-1:2014 käyttämistä tiivisteparametreista. Standardin GOST R 52857.4:2007 normatiivisessa liitteessä H on esitetty tiivisteparametrien arvoja tietyille tiivistetyypeille.

5 Laskentatyökalu

Tässä luvussa esiteltävä laskentatyökalu perustuu standardissa GOST R 52857.4:2007 esitettyyn laskentamenetelmään laippaliitoksen lujuus- ja tiiviystarkastelulle. Laskentatyökalu on esitetty tulosteprintin muodossa liitteessä 1. Laskentatyökalu on rakennettu Excel 2016 taulukkolaskentaohjelmalla hyödyntäen osin VBA (Visual Basic for Applications) ohjelmointikieltä. Laskentaohjelmassa on sisäänrakennettu mittatietopankki, joka sisältää standardin SFS-EN 1092-1:2018 mukaiset, luvussa 2.1 esitellyt laippatyypit 11, 02, 35 ja 05. Mittatietopankki kattaa paineluokat PN 6 – PN 400 ja edellä mainitut laippatyypit siinä nimelliskokolaajuudessa kuin ne ovat kyseisessä standardissa esitelty. Tyypin 01 levylaippaa ei katsottu aiheelliseksi sisällyttää mittatietopankkiin sen vähäisen käytön takia.

Laskentatyökalussa esitettyjen muuttujien lyhenteet noudattavat joiltain osin standardin GOST R 52857.4:2007 käyttämiä lyhenteitä ja joiltain osin standardin SFS-EN 1591-1:2014 käyttämiä lyhenteitä. Käytettyjen lyhenteiden yhteneväisyyttä standardin SFS-EN 1591-1:2014 käyttämiin lyhenteisiin pyrittiin suosimaan laskentamenetelmien vertailun helpottamiseksi. Tätä lähestymistapaa ei kuitenkaan voitu noudattaa johdonmukaisesti, koska paikoitellen laskentastandardit käyttivät samaa lyhennettä eri muuttujista. Näissä tapauksissa noudatettiin standardin GOST R 52857.4:2007 esittämää nimeämistapaa. Standardin GOST R 52857.4:2007 englanninkielisessä käännöksessä käytettiin yhä kyrillisillä kirjaimilla merkittyjä lyhenteitä. Standardin esittämien lyhenteiden ja laskentaohjelmassa käytettyjen lyhenteiden välinen yhteys sekä lyhenteiden merkitys on esitetty laskentaohjelman yhteydessä olevalla välilehdellä.

Käytetyt kaavat on numeroitu vastaamaan standardin kaavanumerointia. Merkinnän yhteydessä oleva kirjain tarkoittaa periaatteessa sitä liitettä, jossa kyseinen kaava esiintyy. Standardin englanninkielisessä versiossa oli paikoitellen havaittavissa käännöksen yhteydessä syntynyttä epäloogisuutta, esimerkiksi merkinnällä (E.1) esitetty kaava löytyy liitteestä F.

5.1 Rajoitukset

Laskentatyökalu kattaa laippatyypeistä luvussa 2.1 esitellyt kauluslaipat, irtolaippa-kaulusrakenteet, umpilaipat sekä hitsattavat levylaipat. Laipan tiivistepinta voi olla tasainen, korotettu tai urallinen. Laippaparin laippojen on joko oltava rakenteeltaan ja mitoiltaan samanlaisia tai toisen laipoista on oltava umpilaippa. Materiaaleiltaan laipat voivat erota toisistaan. Standardin sovellettavuuden ehtona on, että tietyt laippaosan ja kaulusosan mittasuhteet täytyvät. Nämä mittasuhteiden tarkistukset suoritetaan heti työkalun laskentaosuuden alussa.

Tiivistetyypeistä laskentaohjelma kattaa ainoastaan poikkileikkaukseltaan tasomaiset tasotiivisteet, vaikka standardin GOST R 52857.4:2007 mukaan tiiviste voisi olla poikkileikkaukseltaan myös esimerkiksi soikea tai kahdeksankulmainen. Laskentaohjelman on tästä rajoituksesta huolimatta katsottu olevan käyttötarkoitukseensa nähden riittävä, koska valtaosassa prosessiteollisuuden laippaliitoksista käytetään näihin tiivisteisiin lukeutuvia levytiivisteitä, metallitiivisteitä, spiraalikudostiivisteitä tai kampatiivisteitä.

Laskentaohjelma olettaa, että sille annetut laskennassa käytettävät lähtöarvot ovat numeerisessa muodossa ja soveltuvien osien annettujen vaihtoehtojen mukaisia. Ohjelmaan on rakennettu joitakin lähtötietoihin kohdistuvia tarkastuksia, mutta ei kattavaa varoitusjärjestelmää edellä mainitun kaltaisten virheellisten lähtötietojen osalta.

5.2 Tarvittavat lähtötiedot

Laippaliitoksen kestävyys ja kiristysmomentin määrittämiseksi laskentaohjelmalle on annettava seuraavissa alakohdissa luetellut lähtötiedot. Lähtötietojen määrä on suuri, mutta osa lähtötietojen syötöstä on pyritty automatisoimaan laskennan nopeuttamiseksi. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi aikaisemmin mainittu mittatietopankki sekä seuraavassa luvussa esiteltävä liitoksen osien kimmokerrointen ja lämpölaajenemiskerrointen automaattinen määrittely. Lähtötietoa vaativat solut ovat väriltään vaaleankeltaisia. Solujen määrä ja sijainti riippuu valituista laippatyypeistä. Jos tarkasteltava laippa ei kuulu mittatietopankin sisältämiin laippoihin värjäytyvät kaikkien laippatyyppien lähtötietojen syöttösolut vaaleankeltaisiksi. Käyttäjän on tällöin itse osattava täyttää ne kohdat, jotka ovat tarkasteltavan laippaliitoksen kannalta oleellisia.

5.2.1 Laippaliitoksen osien materiaalit

Laskentatyökalun ensimmäiselle sivulle on varattu syöttötilaa, johon voidaan merkitä liitoksien osien materiaalitiedot. Kunkin komponentin syöttöalueen vierellä, tiivisteen syöttötietoa-alue lukuun ottamatta, on alasvetovalikko, josta voidaan valita komponenttia parhaiten vastaava materiaalityyppi (seostamaton tai vähän seostettu teräs, runsasseostettu teräs, austeniittinen teräs tai muu teräs). Tämän materiaalityypityksen avulla ohjelma määrittelee myöhemmässä vaiheessa käyttäjän niin halutessa automaattisesti komponenttien kimmokerrointen ja lämpölaajenemiskerrointen arvot eri kuormitustilanteiden lämpötiloissa. Tämä määrittely suoritetaan standardin SFS EN 13480-3:2017 liitteen G mukaisesti. Tiivisteen syöttötietoa-alue on ainoastaan informatiivinen, käyttäjän on aina itse syötettävä tiivisteen kimmokertoimen arvo. Tiivisteen lämpölaajenemiskerrointa ei ole tarve määritellä, koska sen lämpölaajenemista ei huomioida laskennassa.

5.2.2 Laipan nimelliskoko, paineluokka ja tyyppi

Laskentaohjelma pyytää lähtötietoina laipan nimelliskoon, nimellispaineen (paineluokka) ja tyyppin. Näiden tietojen avulla voidaan myöhemmässä vaiheessa automaattisesti täyttää laskennassa tarvittavat laipan mittatiedot silloin, kun laippatyyppi löytyy mittatietopankista. Laipan ollessa erikoisvalmisteinen, jonkin muun standardin mukainen tai poiketen tyyppiltään mittatietopankin sisältämistä oletuslaipoista, valitaan alasvetovalikosta vaihtoehto ”Muu laippa/muu kuin EN laippa”. Tällöin laipan nimelliskoko ja paineluokka ovat vain informatiivisia ja kaikki tarvittavat mittatiedot on syötettävä käsin.

5.2.3 Laskentapaineet, laskentalämpötilat sekä liitokseen vaikuttavat ulkoiset kuormitukset

Laskennan lähtötietoina tarvitaan asennuslämpötila, koeponnistustilanteen paine ja lämpötila sekä suunnittelutilanteen paine ja lämpötila. Paine syötetään mitattuna paineena ja yksikössä MPa. Tämän lisäksi tarvitaan myös tieto liitokseen vaikuttavista ulkoisista kuormituksista. Analysoitavan laippaliitoksen ollessa osa putkistoa saadaan nämä tiedot yleensä putkistolle suoritetusta joustavuusanalyysistä. Liitokseen kohdistuvan voiman ollessa vetoa syötetään se positiivisena, kun taas liitosta puristava voima syötetään vastavasti negatiivisena. Momentti syötetään ilman etumerkkiä, sillä laskenta käsittelee momentin aina absoluuttisena arvona. Koeponnistustilanteen lämpölaajeneminen oletetaan mitättömäksi ja jätetään laskennassa siksi huomioimatta.

5.2.4 Liittyvän putken ulkohalkaisija, seinämänvahvuus ja korroosiovara

Liittyvän putken ulkohalkaisijatieto täyttyy automaattisesti laskentalomakkeeseen aikaisemmin syötetyn laipan nimelliskoon perusteella olettaen, että putken ulkohalkaisija noudattaa standardin SFS-EN 10220:2003 määrittelemää ulkohalkaisijasarjaa 1. Seinämänvahvuuden arvoksi syötetään laippaan liitettävän putken nimellispaksuus. Tapauksessa, jossa laippaparin laipat yhdistyvät seinämänpaksuudeltaan erivahvuisiin putkiin syötetään nimellispaksuudeksi seinämänpaksuuksista ohuempi. Tieto on oleellinen vain silloin, jos tarkasteltava laippaliitos koostuu putkeen hitsattavista levylaipoista. Muissa tapauksissa lähtötieto on ainoastaan informatiivinen.

Laskennassa mahdollisesti käytettävä korroosiovara huomioidaan liitoksen niissä osissa, jotka ovat kosketuksissa virtaavan aineen kanssa. Korroosiovaran vaikutus huomioidaan laskennassa ainoastaan jännitystasoja määriteltäessä, sen vaikutusta laipan joustavuuteen ei huomioida.

5.2.5 Liitoksen komponenttien keskilämpötilat

Laskentaohjelman lähtötietoihin on mahdollista määritellä aikaisemmin annetuista laskentalämpötiloista poikkeavat komponenttikohtaiset keskilämpötilat suunnittelutilanteessa. Tämä voi olla tarpeellista tapauksissa, joissa laippaliitos on eristämätön. Silloin voidaan olettaa, että esimerkiksi ruuvien lämpötila on sisällön kanssa kosketuksissa olevan laipan lämpötilaa jonkin verran alhaisempi. Jos erillisiä komponenttikohtaisia keskilämpötiloja ei syötetä, olettaa laskentaohjelma komponenttien lämpötilojen noudattavan edellä määriteltyä suunnittelulämpötilaa.

5.2.6 Laippojen ja ruuvien suunnittelujännitykset

Liitoksen eri osien lujuustarkasteluja varten laskentaohjelma tarvitsee lähtötietoina laippojen ja ruuvien suunnittelujännitykset asennustilanteessa, koeponnistustilanteessa sekä suunnittelutilanteessa. Ruuvien suunnittelujännityksenä käytetään standardin GOST R 52857.4:2007 mukaisia nimellisiä jännityksiä. Nämä jännitykset voidaan määrittää erillisen laskentavälilehden ”Ruuvien laskentalujuus” avulla, joka sijaitsee samassa tiedostossa

kuin itse laskentaohjelma. Laippojen ja liittyvän putken suunnittelujännitykset eri kuormitustapauksissa voidaan määritellä laskentatapauksessa sovellettavan suunnittelustandardin mukaisesti.

5.2.7 Liitoksen osien kimmokertoimet ja lämpölaajenemiskertoimet

Liitoksen eri osien materiaaliominaisuudet muuttuvat lämpötilan funktiona. Eri kuormitustilanteiden lämpötilat eroavat usein toisistaan, josta johtuen lähtötiedoiksi tarvitaan ruuvimateriaalin ja laippamateriaalien kimmokertoimet sekä lämpölaajenemiskertoimet niin asennustilanteessa, koeponnistustilanteessa kuin suunnittelutilanteessa. Nämä tiedot voidaan määritellä joko automaattisesti tai syöttää käsin. Tiivisteen kohdalla riittävät tässä mainituista lähtötiedoista asennustilanteen ja suunnittelutilanteen kimmokerrointen arvot.

5.2.8 Laippojen ja tiivisteen mitat sekä ruuviparametrit

Laskentaohjelma sisältää mittatietopankin, jota voidaan käyttää hyödyksi laippojen mittoja syötettäessä sen sisältämien laippatyypin puitteissa. Mitat voidaan myös aina syöttää käsin. Mittatietopankkia käytettäessä täyttyvät myös laskennassa tarvittavat ruuviparametrit automaattisesti. Laskentaohjelman oletuksena on, että ruuvit ovat metrisiä ISO-karkeakierteisiä ruuveja. Käytettäessä ruuveja, joissa on ohennettu halkaisija, on ruuvin ohuimman kohdan halkaisija korjattava lähtötietoihin. Laskentaohjelma tarvitsee myös tiedon siitä, käytetäänkö liitoksen kiinnittämiseen ruuveja vai vaarnaruuveja. Ruuviparametrien automaattinen syöttö on ruuvien kokoa ja lukumäärää lukuun ottamatta mittatietopankista riippumaton. Ruuvien koko ja lukumäärä voidaan siis syöttää käsin, jolloin ohjelma täyttää näiden tietojen perusteella loput ruuviparametrit. Tiivisteen mittatiedoista tarvitaan sen sisä- ja ulkohalkaisija sekä tiivisteen paksuus. Spiraali- ja kampatiivisteillä tämä tarkoittaa sen tiivistävän osan sisä- ja ulkohalkaisijaa.

Edellä mainittujen lisäksi tarvitaan tieto siitä, miten ruuvien kiristystä kontrolloidaan sekä kiinnitykseen vaikuttavat kitkakertoimet. Kiristysten kontrollointi on jaettu kolmeen kategoriaan; kiristystä ei kontrolloida, kiristystä kontrolloidaan mittaamalla momenttia, tai kiristystä kontrolloidaan mittaamalla ruuvien venymää. Kitkakertoimista tarvitaan kierteen voiteluaineen kitkakerroin ja mutterin tai ruuvin kannan alla oleva kitkakerroin.

5.2.9 Tiivisteparametrit

Tiivisteparametreista laskentaohjelma tarvitsee tiivisteen pienimmän asettumispaineen asennustilanteessa (q_{\min}) sekä suurimman sallitun puristusjännityksen suunnittelutilanteessa (q_{\max}). Näiden lisäksi tarvitaan tiivisteen virumiskerroin (P_{QR}) ja kimmokerroin niin asennustilanteessa kuin suunnittelutilanteessa, sekä tiivistevakio m .

Tiivisteparametrien arvoina tulisi käyttää tiivistetoimittajalta saatavia arvoja. Ohjeellisia q_{\min} ja m arvoja eri tiivistetyypeille on saatavilla myös standardin SFS-EN 1591-1:2014 liitteessä G. Jos käytettävissä olevat kimmokerrointen arvot on esitetty siihen kohdistuvan kuormituksen funktiona, voidaan ensisijaisesti käyttää kuormitusta 20 MPa vastaavaa arvoa. Tätä arvoa voidaan korjata myöhemmin, jos tiivisteeseen oikeasti kohdistuva puristusjännitys poikkeaa tästä merkittävästi.

5.3 Ohjelman antamat tulokset

Laskentaohjelma määrittelee tarvittavan esikiristysvoiman (kiristysmomentin) ottaen huomioon kaikki liitokseen vaikuttavat kuormitustilanteet mukaan lukien mahdolliset ulkoiset kuormitukset. Tämän lisäksi ohjelma tarkastelee laippaliitoksen osien kestävyyttä eri kuormitustilanteissa sekä laippojen kiertymistä suunnittelu- ja koeponnistustilanteissa.

5.3.1 Kiristysmomentti

Kiristysmomentti määritellään tarvittavan esikiristysvoiman perusteella, ottaen huomioon sekä ruuvien voitelussa käytettävän voiteluaineen kitkakerroin että mutterin tai ruuvien kannan ja laipan välinen kitkakerroin. Tarvittavaa esikiristysvoimaa määriteltäessä laskentamenetelmä huomioi sekä tiivisteen asennustilanteen pienimmän vaaditun pintapaineen että liitokseen kohdistuvat ja sitä mahdollisesti avaamaan pyrkivät voimat. Näiden lisäksi varmistetaan, että edellä mainittujen ehtojen perusteella määritetty kuormitus on vähintään 40 prosenttia siitä kuormituksesta, joka ruuville sallitaan asennustilanteessa.

5.3.2 Laippaliitoksen komponenttien kuormitustaso ja laippojen kiertymä

Laskentaohjelma ilmaisee laippojen ja ruuvien kuormitustason eri tilanteissa niin kutsuttujen käyttökertoimien avulla. Käyttökertoimet kertovat komponenttien kuormitustason sallittuun kuormitukseen nähden. Käyttökertoimen ollessa enintään yhtä suuri kuin yksi voidaan kyseisen komponentin kuormitustason katsoa olevan hyväksytyissä rajoissa. Laipoille laskentaohjelma määrittelee useita eri käyttökertoimia, koska se tarkastelee erikseen sekä laipparenkkaan että kauluksen kestävyyttä. Näistä käyttökertoimista suurin tulostuu laskentaohjelman lopussa olevaan yhteenveto-osioon. Muut käyttökertoimet ovat nähtävissä laskentaosiossa.

Kuormitustasojen lisäksi laskentaohjelma tarkastelee laippojen kiertymää koeponnistus- ja suunnittelutilanteissa. Myös kiertymän suuruus on ilmaistu käyttökertoimena sallittuun kiertymään nähden. Sallittu kiertymän suuruus eri kuormitustilanteissa ja eri laippatyypeille on määritetty laskentastandardissa.

5.4 Laskentaohjelmalla toteutettu esimerkkilaskelma

Tässä luvussa käydään läpi laskentamenetelmän eteneminen pääpiirteittäin esimerkkilaskelman avulla. Laskennan pituuden vuoksi käsittelyä ei ole tässä esitetty kokonaisuudessaan, täydellinen laskelma löytyy liitteestä 1.

Tarkasteltava laippaliitos on kahden standardin SFS-EN 1092-1:2018 tyyppin 11 mukaisen kauluslaipan muodostama liitos. Laippojen paineluokka on PN 10 ja nimelliskoko DN 200. Laippojen materiaali on hiiliteräs P250GH ja ruuvien materiaali seostettu teräs 25CrMo4. Liitoksessa käytettävä tiiviste on Klingersil C-4500 hiilikuituinen tasotiiviste. Laippaliitokseen kohdistuu suunnittelutilanteessa puristava voima suuruudeltaan 3000 N

ja taivutusmomentti suuruudeltaan 5000 Nm. Koeponnistustilanteessa liitokseen ei kohdistu merkittäviä ulkoisia kuormituksia. Laskennassa huomioitavan korroosiovaran suuruus on 1 mm.

5.4.1 Lähtötietojen syöttö

Laskentaohjelma tarvitsee kaikki luvussa 5.2 esitetyt lähtötiedot laskennan suorittamiseksi. Kuvassa 15 on esitetty laskentaohjelman ensimmäinen sivu, jossa määritellään tarkasteltavan laippaliitoksen perustiedot. Kuvan oikeassa laidassa näkyvät luvuissa 5.2.1 ja 5.2.2 mainitut alavetovalikot.

LÄHTÖTIEDOT							
Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]	
	11	11	200	10	0,8	200	

TARKASTELTAVA LAIPPALIITOS			
Laippa			
Laippa / olake	P250GH (SFS-EN 10222-2:2017)	Seostamattomat ja vähän s. teräkset ▼	
Irtolaippa		Seostamattomat ja vähän s. teräkset ▼	
Vastalaippa			
Laippa /olake	P250GH (SFS-EN 10222-2:2017)	Seostamattomat ja vähän s. teräkset ▼	
Irtolaippa		Seostamattomat ja vähän s. teräkset ▼	
Muut osat			
Ruuvi	25CrMo4 (SFS-EN 10269:2013)	Seostamattomat ja vähän s. teräkset ▼	
Liittyvä vaippa/putki		▼	
Välivaruste		▼	
Tiiviste	hiilikuitu, Klingersil C 4500		
Nimelliskoko	DN	200	
Nimellispaine	PN	10	
Laipan standardi/tyyppi/numero		11	EN 1092-1 Kauluslaippa tyyppi 11 ▼
Vastalaipan standardi/tyyppi/numero		11	EN 1092-1 Kauluslaippa tyyppi 11 ▼
Koeponnistuspaine	$P^K =$	1,26 MPa	
Suunnittelupaine	$P^S =$	0,80 MPa	
Asennuslämpötila	$T^A =$	20 °C	
Koeponnistuslämpötila	$T^K =$	20 °C	
Suunnittelulämpötila	$T^S =$	200 °C	

Kuva 15. Kuvakaappaus laskentaohjelman ensimmäisestä sivusta, johon täytetään tarkasteltavan liitoksen perustiedot.

Esimerkkilaskelmassa käytetyt suunnittelujännitykset määriteltiin laippojen osalta standardin SFS-EN 13480-3:2017 mukaisesti ja ruuvimateriaalien osalta standardin GOST R 52857.4:2007 mukaisesti. Liitoksen mitat haettiin laskentaohjelman mittatietopankista. Kuvassa 16 näkyy mittatietojen syöttöalueen alkuosa. Tietojen täyttö mittatietopankista aloitetaan kuvan ylälaidassa näkyvän ”Mittatietojen täyttö”-painikkeen avulla. Kuvan oikeassa laidassa näkyvät huomiotekstit ovat lähinnä informatiivisia standardilaippoja laskettaessa, mutta nämä on huomioitava muita laippoja laskettaessa.

LÄHTÖTIEDOT						
Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200
LAIPAN MITAT			Mittatietojen täyttö			

Kiinteän laipan laippareenkaan tai irtolaipparakenteen kauluksen tiedot

Laipan tyyppi	$F_{typ1} =$	0	$F_{typ1} = 0$, kauluslaippa ; 1, irtolaipparak. ; 2, levylaippa			
Laipan ulkohalkaisija	$D_{F1} =$	340	mm			
Kauluksen (olakkeen) ulkohalkaisija	$D_{H1} =$		mm			
Laipan tai kauluksen (olakkeen) sisähalkaisija	$d_{H1} =$	206,5	mm			
Kauluksen (olakkeen) ja irtolaipan uloin kontaktihalk.	$D_{S1} =$		mm		viiste huomiotava tarvittaessa	
Laipan tiivistepinnan ulkohalkaisija	$D_{FG1} =$	268	mm			
Laipan tiivistepinnan sisähalkaisija	$d_{FG1} =$	206,5	mm			
Jakopyrjän halkaisija	$D_{jako1} =$	295	mm			
Nimellinen paksuus	$h_1 =$	24	mm		sisältää mahdolliseen koroikeosan	

Laipan tai kauluksen (olakkeen) kaulusosan tiedot:

Kauluksen korkeus	$l_1 =$	22	mm
Ohuen pään minimipaksuus	$S_{0,1} =$	6,3	mm
Paksumman pään minimipaksuus	$S_{1,1} =$	13,75	mm

Irtolaipan tiedot:

Ulkohalkaisija	$D_{L1} =$		mm
Sisähalkaisija	$d_{L1} =$		mm
Lämpölaajeneva paksuus	$h_{L1} =$		mm

Kuva 16. Mittatietojen täyttöalueen alkuosa.

5.4.2 Laskentaosuus

Ohjelman laskentaosuus sisältää kaikkien ohjelman kattamien laippaliitosten tarkastelemiseen tarvittavat kaavat. Kaavan standardia vastaava kaavanumero esitetään sivun oikeassa laidassa kulloisenkin kaavan yhteydessä. Koska kaavat ovat osin riippuvaisia laippatyypistä, on laskentapohjassa aina kaavoja, jotka eivät koske tarkastelun alaista liitosta. Näihin laskentalomakkeen kohtiin ei tulostu mitään. Tämän lisäksi kohdat on merkitty sivun oikeassa laidassa olevalla huomautustekstillä.

Useat laskentaosuudessa määriteltävät arvot lasketaan erikseen liitoksen molemmille laipoille. Tulokset esitetään kahdessa erillisessä sarakkeessa: vasemmanpuoleinen sarake sisältää ensimmäisen laipan arvot ja oikeanpuoleinen sarake vastalaipan arvot. Sarakkeet eroavat pohjaväriältään siten, että ensimmäisen laipan tulostusalueen pohjaväri on valkoinen ja vastalaipan harmaa. Umpilaippaa ei tarkastella muuta kuin liitoksen jäykkyyteen vaikuttavana osana, joten vastalaipan ollessa umpilaippa ei oikeanpuoleisiin sarakkeisiin tulostu arvoja.

Laskenta alkaa tiivisteiden tehollisen leveyden määrittämisellä. Tiivisteiden tehollinen leveys määräytyy luvussa 4.3 esitetyn mukaisesti tietyntä suhteena tiivisteiden todelliseen leveyteen. Tänä todellisena leveytenä pidetään tiivisteiden sen osan leveyttä, joka asettuu laipan tiivistepintojen väliin. Toisin sanoen, jos levytiivisteiden ulkohalkaisija on laipan tiivistepinnan ulkohalkaisijaa suurempi, määräytyy tiivisteiden todellinen leveys laipan tiivistepinnan ulkohalkaisijan ja tiivisteiden sisähalkaisijan erotuksena.

Tiivisteiden tehollisen leveyden määrittämisen jälkeen lasketaan eri kuormitustilanteissa tarvittavat tiivistevärimat sekä liitoksen eri osien joustavuudet. Joustavuudet ilmaistaan kyseisen osan jousivakion käänteislukuna, kuten kuvassa 17 nähdään tiivisteiden ja ruuvien

osalta. Tiivisteen joustavuus lasketaan erikseen sekä asennustilanteelle että suunnittelutilanteelle, jotta liitoksen lämpötilan vaikutus tiivisteen kimmokertoimeen ja virumistaipumukseen saadaan huomioitua.

Liitoksen joustavuuskertoimet (liite I)

Tiivisteen joustavuus

$$y_G = \frac{e_G * P_{QR}}{E_G * \pi * d_{Ge} * b_G} \quad y_G^A = 8,74E-08 \quad \text{mm/N} \quad (I.1)$$

$$y_G^S = 4,97E-08 \quad \text{mm/N}$$

Ruuvien joustavuus

$$y_B = \frac{L_B}{E_B^A * A_{Bmin} * n} = 1,46E-07 \quad \text{mm/N} \quad (I.2)$$

Kuva 17. Tiivisteen sekä ruuvien joustavuuden määrittäminen. Tiivisteen joustavuus määritellään erikseen asennustilanteelle ja suunnittelutilanteelle.

Laipan kiertojoustavuuden määrittelemiseksi on laskettava useita eri laipan mittasuhteista riippuvia apusuureita. Suurin osa näistä apusuureista on laskettavissa suoraan kaavoin, mutta kauluslaippojen ja levylaippojen kohdalla on muutama määriteltävä standardissa esitetyistä kuvaajista. Laskennan nopeuttamiseksi on näiden kuvaajien sisältämä tieto tuotu laskentapohjan makroon, jolloin määrittely voidaan suorittaa painamalla kuvassa 18 näkyviä ”Laske”-painikkeita.

$$\beta_V = \frac{1}{K-1} * (0.69 + 5.72 * \frac{K^2 * \lg K}{K^2 - 1}) = 4,103 \quad 4,103 \quad (I.7)$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 2,169 \quad 2,169 \quad (I.8)$$

$$\beta_F = 0,797 \quad 0,797 \quad (\text{Kuva. I.2})$$

$$\beta_V = 0,182 \quad 0,182 \quad (\text{Kuva. I.3})$$

$$f = 1,135 \quad 1,135 \quad (\text{Kuva. I.4})$$

Kuva 18. Osa laipan joustavuuden määrittelemisessä tarvittavista apusuureista. Kuvaajista määriteltävät vakiot saadaan automaattisesti painamalla ”Laske”-painiketta.

Seuraavaksi edetään liitoksen kokonaisjäykkyyden määrittelemiseen suunnittelutilanteessa. Jäykkyyteen vaikuttavat liitoksen eri osien joustavuudet ja ruuvivoiman momenttivarsi, kuten luvussa 3.2 esitettiin. Koska ruuvien joustavuus ja laippojen joustavuus on määriteltävä ainoastaan asennustilanteelle, on liitoksen suunnittelutilanteen kokonaisjäykkyyttä määriteltäessä huomioitu lämpötilan myötä pienenevän kimmokertoimen vaikutus luvun 3.3 kaavan (13) mukaisesti. Kokonaisjäykkyyden lisäksi lasketaan erilliset jäykkyydskertoimet liitokseen kohdistuvien voimien ja momenttien vaikutusten määrittelyä varten.

Ennen tarvittavan esikiristysvoiman määrittelyä on vielä vuorossa paineesta aiheutuvien kuormien määrittely koeponnistus- ja suunnittelutilanteessa sekä liitoksen eri osien mahdollisesta erisuuruudesta lämpölaajenemisesta aiheutuvan kuormituksen määrittely.

Asennustilanteen ruuvivoiman, eli tarvittavan esikiristysvoiman, määrittelyperuste on seuraavanlainen: asennustilanteessa tarvittavaa tiivistevoimaa, koeponnistustilanteessa

liitokseen vaikuttavia voimia sekä suunnittelutilanteessa liitokseen vaikuttavia voimia verrataan toisiinsa ja näistä voimista valitaan suurin. Koeponnistustilanteen ja suunnittelutilanteen antama vertailuarvo koostuu asennustilanteen tarvittavasta voimasta, johon lisätään liitosta avaamaan pyrkivät voimat ja josta vähennetään liitosta puristavat voimat. Asennustilanteen ruuvivoiman määrittelemiseen käytettäviä kaavoja on esitetty kuvassa 19. Näistä voimista suurinta verrataan vielä voimaan, jolla ruuviin aikaansaadaan jännitystila, joka vastaa 40 prosenttia sen asennustilanteen nimellisestä suunnittelujännityksestä. Ruuvien esikivistysvoima on näistä kahdesta voimasta suurempi. Tämän viimeisen vertailun avulla halutaan varmistaa ruuvien riittävä jännitystila. Ruuvi relaxoituu eli menettää osan jännityksestään kiristuksen jälkeen (Abid & Nash 2005). Hyvin pienen esikivistysvoiman seurauksena oleva alhainen jännitystila ruuvissa saattaa siis relaxaation vaikutuksesta johtaa puristusvoiman menetykseen.

Asennustilanteen ruuvivoima

Tarvittava esikivistysvoima koeponnistustilanne ja suunnittelutilanne huomioon ottaen

$$F_{B1} = \max \left[\begin{array}{l} \alpha * (F_p + F) + F_G + \frac{4 * \alpha_M * |M|}{d_{Ge}} \\ \alpha * (F_p + F) + F_G + \frac{4 * \alpha_M * |M|}{d_{Ge}} - F_T \end{array} \right], \begin{array}{l} F_{B1}^K = 156097 \text{ N} \\ F_{B1}^S = 171361 \text{ N} \end{array}$$

Tarvittava (laskettu) esikivistysvoima riittävän puristusapaineen aikaansaamiseksi

$$F_{B2} = \max\{F_{G0}; 0.4 * A_{B,TOT} * \sigma_y^B\} = 182313 \text{ N}$$

Asennustilanteen ruuvivoima on suurempi kahdesta seuraavasta arvosta:

$$F_B^A = \max\{F_{B1}; F_{B2}\} = \boxed{182313} \text{ N} \quad (17)$$

Kuva 19. Esikivistysvoima määritellään vertaamalla liitokseen eri tilanteissa vaikuttavia voimia ja valitsemalla näistä suurin.

Tarkasteltavassa laskentaesimerkissä tiivisteiden asennustilanteessa tarvittava tiivistevä voima oli verrattavista voimista suurin. Tämän voiman perusteella määräytyi asennustilanteessa tarvittava kiristysmomentti.

Edellä määritellyn esikivistysvoiman perusteella voidaan laskea ruuveihin koeponnistustilanteessa ja suunnittelutilanteessa vaikuttavan voiman suuruus. Näiden voimien ruuveihin aiheuttamaa jännitystilaa verrataan ruuvien eri kuormitustilanteiden sallittuihin jännityksiin. Nämä sallitut jännitykset muodostuvat nimellisten jännitysten pohjalta siten, että nimellistä jännitystä kerrotaan standardin määrittelemillä kertoimilla. Nämä kertoimet sekä ruuvien asennustilanteen kuormitusasteen tarkastelu on esitetty kuvassa 20.

Ruuvin ja tiivisteiden jännitystarkastelu

Tarkasteluissa käytettävät kertoimet

$$\xi = 1,2$$

$$K_{\text{cond}} = 1 \text{ käyttötilanteessa}$$

$$= 1,35 \text{ koeponnistustilanteessa}$$

$$K_{\text{cont}} = 1 \text{ jos kontrolloimaton kiristys}$$

$$= 1,1 \text{ jos kiristysmomenttia kontrolloidaan}$$

$$= 1,3 \text{ jos ruuvin venymää kontrolloidaan}$$

$$K_T = 1,3 \text{ (lämpölaajenemisesta aiheutuvat kuormat huomioidaan, ohjelman oletus)}$$

Ruuvin vaikuttava jännitys asennustilanteessa

$$\sigma_B^A = \frac{F_B^A}{A_B} = 101 \text{ MPa} \quad (19)$$

$$\sigma_{B,\text{sall}}^A = \xi * K_{\text{cond}} * K_{\text{cont}} * K_T * \sigma_{B,\text{nim}}^A = 269 \text{ MPa} \quad (\text{D.3})$$

$$\sigma_B^A \leq \sigma_{B,\text{sall}}^A \quad 0,38 \quad \text{OK} \quad (21)$$

Kuva 20. Ruuvien sallittujen jännitysten laskemisessa käytettävät kertoimet ja ruuvin asennustilanteen kuormitusasteen määrittely.

Ruuvin kuormitusasteiden tarkastelujen jälkeen tarkastellaan tiivisteiden kuormitusastetta. Eri kuormitustapauksissa vaikuttavista ruuvivoimista suurimman aiheuttamaa jännitystasoa tiivisteessä verrataan tiivisteiden suunnittelutilanteen sallittuun jännitykseen.

Laskennan seuraavassa osassa siirrytään laippojen lujuustarkasteluun. Laippoihin kohdistuvien kuormitusten aiheuttama momentti rasittaa laippaa ja synnyttää siihen jännitystilaa. Tämän jännitystilaa tarkastellaan erikseen asennustilanteessa, koeponnistustilanteessa sekä suunnittelutilanteessa. Asennustilanteen tarkastelu poikkeaa hieman kahdesta muusta tarkastelusta siltä osin, että siinä huomioidaan ainoastaan esikiristysvoiman kuormittava vaikutus. Muissa tapauksissa huomioidaan myös liitoksen kohdistuva painekuorma sekä ulkoiset kuormitukset.

Tarkasteluja tehdään useampia, sekä eri jännitystyypeille että eri kohdissa laipparakennetta. Kuvassa 21 on esitetty laippaosan asennustilanteen radiaali- ja tangentialijännityksen laskentakaavat ja tulokset. Kuvan oikeassa alanurkassa näkyy myös tämän luvun alussa mainittu huomautusteksti koskien kaavoja, jotka eivät liity tarkasteltaviin laipatyyppeihin.

Laippaosan jännitykset

Kauluslaippa, levylaippa, irtolaipparakenteen kaulus

Radiaali- ja tangentialijännitys

$$\sigma_R^A = \frac{(1,33 * \beta_F * h + l_0)}{\lambda * h^2 * l_0 * d} * M^A = 57,2 \text{ MPa} \quad \text{Laippa} \quad \text{Vastalaippa} \quad 57,2 \text{ MPa} \quad (31)$$

Tangentialijännitys

$$\sigma_T^A = \frac{\beta_y * M^A}{h^2 * d} - \beta_z * \sigma_R^A = 58,0 \text{ MPa} \quad (32)$$

Irtolaippa

Tangentialijännitys

$$\sigma_{T,L}^A = \frac{\beta_y * M_L^A}{h_L^2 * d_L} = \text{MPa} \quad \text{MPa} \quad (33)$$

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Kuva 21. Laippaosan radiaali- ja tangentialijännitys asennustilanteessa. Kuvan alalaidassa oleva kaava ei koske tarkasteltavaa liitosta.

Laippoihin muodostuvien jännitysten ollessa tiedossa suoritetaan jännitystason tarkastelut, joissa näiden jännitysten yhdistelmiä verrataan standardin määrittelemiін sallittuihin jännitystasoihin. Nämä sallitut jännitystasot vaihtelevat niihin verrattavien jännitysyhdistelmien mukaan. Kuvassa 22 on esitetty esimerkki laipan kaulusosan koeponnistustilanteen jännitystarkastelusta. Molempien kuvissa näkyvien tarkastelujen jännitysten suhde on alle yksi eli ne ovat sallituissa rajoissa. Tätä indikoi myös jännitysten suhteen vieressä oleva merkintä ”OK”.

Laipan jännitystarkastelu

KOEPONNISTUSTILANNE

Kauluslaipan kaulusosan paksu pää

$$\max\{|\sigma_1^K - \sigma_{1M,M}^K + \sigma_R^K|; |\sigma_1^K - \sigma_{1M,M}^K + \sigma_T^K|; |\sigma_1^K + \sigma_{1M,M}^K|\} \leq K_T * 1.5 * \sigma_{F1}$$

Laskettu jännitys [MPa]

189,0

189,0

(44)

Sallittu jännitys [MPa]

444,6

444,6

Jännitysten suhde

0,43

OK

0,43

OK

Kauluslaipan kaulusosan ohut pää

$$\max\{|\sigma_0^K \pm \sigma_{0M,M}^K|; |0.3 * \sigma_0^K \pm \sigma_{0M,0}^K|; |0.7 * \sigma_0^K \pm (\sigma_{0M,M}^K - \sigma_{0M,0}^K)|\} \leq 1.3 * 3 * \sigma_{F1}$$

Laskettu jännitys [MPa]

165,3

165,3

(46)

Sallittu jännitys [MPa]

889,2

889,2

Jännitysten suhde

0,19

OK

0,19

OK

Kuva 22. Kauluslaipan kaulusosan koeponnistustilanteen jännitystarkasteluja, molemmat tarkastellavat jännitystasot ovat sallituissa rajoissa.

Laskennan lopuksi tarkastellaan vielä liitokseen kohdistuvan kuormituksen aiheuttamaa laippojen kiertymistä. Kiertymän on pysyttävä sekä koeponnistustilanteessa että suunnittelutilanteessa standardin määrittelemissä sallituissa rajoissa. Laskentamenetelmä ei tarkastele laippojen kiertymän suuruutta asennustilanteessa. Laippojen kiertyminen vaikuttaa tiivisteseen kohdistuvaan pintapaineeseen luvussa 3.4 kuvatulla tavalla. Kiertymän rajoittaminen varmistaa osaltaan liitoksen tiiviyn.

Laskennan tulokset on koottu yhteen laskentaohjelman viimeiselle sivulle, joka on esitetty kuvassa 23. Sivun yläosassa toistetaan alussa ilmoitetut materiaalitiedot. Kuvan mukaisesti tiedoista siirtyvät ainoastaan vaaleankeltaisille syöttöalueille täytetyt tiedot, alusvetovalikoiden tiedot koskien materiaalityyppejä eivät välity. Näiden tietojen alapuolelle on koottu liitoksen eri osien käyttökertoimet niissä kuormitustilanteissa, joissa niitä on tarkasteltu. Sivun alalaitaan tulostuu myös tieto määritellystä kiristysmomentista.

YHTEENVETO						
Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

TULOSTEN YHTEENVETO

Laippa 1

Laippa / olake

P250GH (SFS-EN 10222-2:2017)

Irtolaippa

Laippa 2

Laippa /olake

P250GH (SFS-EN 10222-2:2017)

Irtolaippa

Muut osat

Ruuvi

25CrMo4 (SFS-EN 10269:2013)

Liittyvä vaippa/putki

Välivaruste

Tiiviste

hiilikuitu, Klingersil C 4500

Asennustilanne	Koeponnistustilanne	Suunnittelutilanne
----------------	---------------------	--------------------

Laippa

Kaulusosa

0,56

0,43

1,03

Laippaosaa

Laippa / irtolaipan kaulus

0,28

0,22

0,55

Irtolaippa

Laipan kiertymä

Laippa / irtolaipan kaulus

0,32

0,55

Irtolaippa

Vastalaippa

Kaulusosa

0,56

0,43

1,03

Laippaosaa

Laippa / irtolaipan kaulus

0,28

0,22

0,55

Irtolaippa

Laipan kiertymä

Laippa / irtolaipan kaulus

0,32

0,55

Irtolaippa

Ruuvi

0,38

0,30

0,46

Tiiviste

0,13

Kieristysmomentti

101

Nm

Kuva 23. Laskennan tulokset on koottu yhteenvetosivulle. Tuloksista on nähtävissä, että laippojen kaulusosien jännitustasot ylittävät sallitun.

Kuten luvussa 5.3.2 mainittiin, jos tietylle laipan kohdalle on määritelty useita käyttökertoimia, on yhteenveto-osioon tuotu vain näistä käyttökertoimista suurin. Käyttökertoimen ylittäessä arvon yksi muuttuu se punaiseksi, joka indikoi sallitun kuormitustason ylitystä. Tässä laskentaesimerkissä kauluslaipan kaulusosan jännitys ylitti niukasti sallitun jännityksen.

6 Verifiointi

Laskentatyökalu verifioitiin vertaamalla sen antamia tuloksia käsin laskettuihin tuloksiin. Edellisessä luvussa esitetty esimerkkilaskelma laskettiin verifiointitarkoituksessa myös Mathcad- laskentaohjelmalla. Tulosteet koskien kyseistä laskentaa on esitetty liitteessä 2. Laskentaohjelman antamia tuloksia verrattiin myös standardin SFS-EN 1591-1:2014 mukaisiin tuloksiin. Näiden kahden laskentamenetelmän antamia tuloksia on analysoitu tarkemmin luvussa 7. Vertailulaskentojen ja tehtyjen herkkyyssanalyysien avulla tarkasteltiin myös laskentaohjelmien antamien tulosten johdonmukaisuutta verrattuna tiettyihin laippaliitoksia koskeviin perusoletuksiin.

6.1 Yleistä tehdyistä laskennoista

Laskennoista saaduista tuloksista kirjattiin vertailuja varten pienin tarvittava esikiristysvoima tätä voimaa vastaavan kiristysmomentin sijasta. Tämä lähestymistapa perustui siihen, että laskentamenetelmien kiristysmomenttien määrittelytavoissa oli eroavaisuuksia. Kiristysmomentin määrittäminen esikiristysvoiman perusteella on puhtaasti kone-elinoppiin perustuvaa, mihin tarkasteltava laippaliitos ei vaikuta muilta osin kuin ruuvien koon sekä liitospintojen kitkakertoimien osalta.

Sekä vertailulaskennoista että herkkyyssanalyyseistä saadut tulokset taulukoitiin ilman erillisiä merkintöjä huolimatta siitä, ylittikö saatu laskentatuloks laipan sallitun jännityksen tai laipalle sallitun suurimman kiertymän. Tästä syystä kaikki esitetyt arvot ovat ainoastaan vertailukäyttöä varten ja niitä ei voi sellaisenaan käyttää todellisten laippaliitosten suunnittelun perustana. Tiivisteen suurin sallittu jännitys ei ylittynyt missään laskentataulukossa. Tiivisteseen kohdistuvan kuormituksen ollessa alueella, jolla tiivisteelle ei oltu määritelty tiivistearvoja käytettiin lähimpiä määriteltyjä arvoja. Tuloksena saatu esikiristysvoima on koko liitoksen esikiristysvoima, ei yksittäisen ruuvin tarvittava esikiristysvoima.

Kaikki lasketut laipat olivat standardin SFS-EN 1092-1:2018 mukaisia. Kauluslaipat olivat tyyppiä 11, irtolaipat tyyppiä 02 ja irtolaippojen kanssa käytettävät kaulusrakenteet tyyppiä 35. Kauluslaippojen ja irtolaippojen materiaalina oli hiiliteräs P250GH, irtolaippojen kaulusrakenteiden materiaalina austeniittinen teräs 1.4404 ja ruuvien materiaalina seostettu teräs 25CrMo4. Laskentojen oletustiivisteenä käytettiin teflontiivistettä Klinger Topchem 2000, muut tiivistet on erikseen mainittu asianmukaisissa kohdissa. Tiivisteen mittastandardeina käytettiin standardeja SFS-EN 1514-1:1997 ja SFS-EN 1514-2:2014. Liitosten koeponnistuspaine määriteltiin standardin SFS-EN 13480-5:2017 mukaisesti.

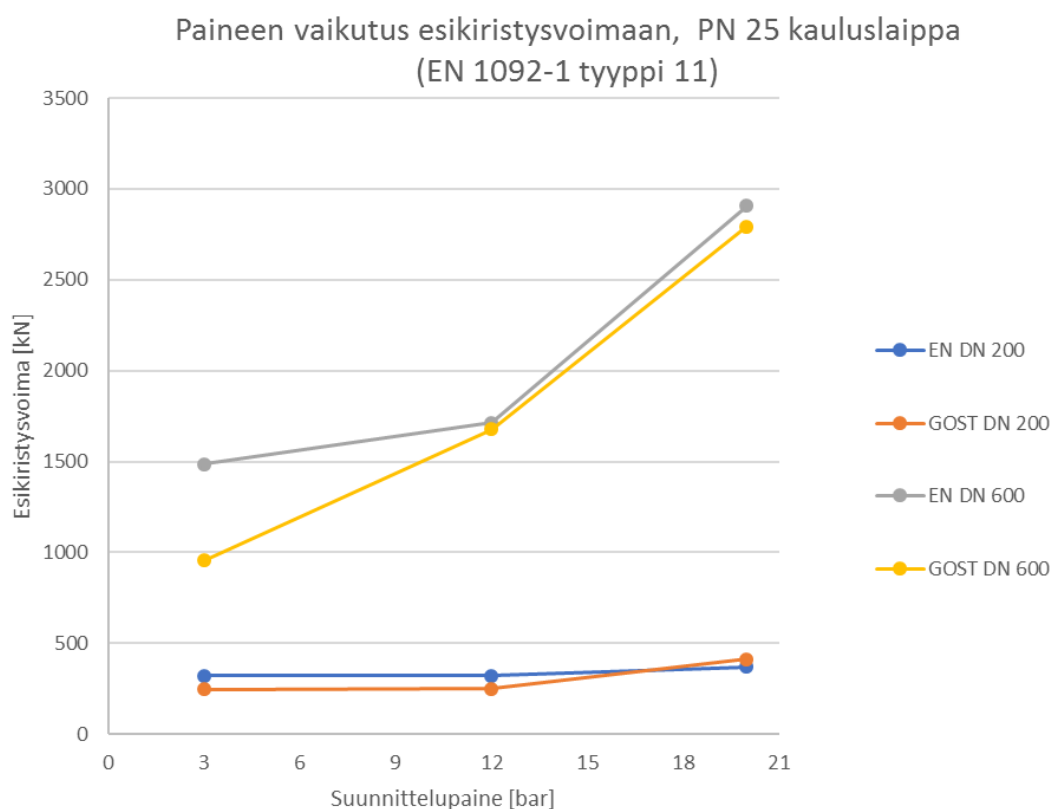
Standardin GOST R 52857.4:2007 normatiivisessa liitteessä H esitetyt tiivistetyypit eivät täsmänneet erityisen hyvin tässä työssä käytettyjen tiivisteen kanssa. Tästä syystä myös standardin GOST 52857.4:2007 mukaisissa laskennoissa käytettiin tiivisteille annettuja, standardin SFS-EN 13555 mukaisia kimmokertoimen sekä virumiskertoimen P_{QR} arvoja. Muina tiivistevakioina käytettiin valmistajan antamia m- ja y-arvoja, joista jälkimmäisen katsottiin vastaavan laskentamenetelmässä käytettyä tiivisteen pienintä vaadittua puristuspainetta asennustilanteessa. Näiden m- ja y-arvojen käyttöä pidettiin perusteltuna, koska standardin GOST R 52857.4:2007 esittelemä laskentamenetelmä pohjautui selkeästi osittain niin kutsuttuun Taylor Forge- menetelmään (Modern Flange Design Bulletin

502 1950). Tähän samaan menetelmään pohjautuu myös standardin ASME Section VIII Division 1 esittelemä laskentamenetelmä, jota varten nämä m- ja y-arvot on määritelty.

Luvussa 5.1 mainituista mittasuhteiden tarkistuksista yksi koski laipan kaulusosaa, tai tarkemmin sanottuna sen kartiokkaan osan kaltevuutta. Standardin GOST R 52857.4:2007 määrittelemän raja-arvon perusteella tämän kartiokkaan osan oli oltava hyvin loiva. Kaikki lasketut SFS-EN 1092-1:2018 mukaiset kauluslaipat eivät täyttäneet tätä ehtoa. Koska ylitys ei yleisesti ottaen ollut suuri ja laskennat olivat vain vertailua varten, suoritettiin laskennat tästä huolimatta.

6.2 Verifioinnissa käytetyt oletukset

Verifioinnissa käytettiin kolmea laippaliitoksen peruskäyttötymiseen pohjautuvaa oletusta. Ensimmäinen oletus perustui siihen, että tarvittavan esikiristysvoiman voidaan olettaa kasvavan, tai vähintään pysyvän samana, liitokseen kohdistuvan avaavan kuormituksen kasvaessa. Kuvassa 24 on esitetty PN 25 tyyppin 11 kauluslaipalle todettu tarvittavan esikiristysvoiman muutos kahdessa eri nimelliskoossa, DN 200 ja DN 600. Tarkastelu suoritettiin suunnittelulämpötilalla 200 °C ja suunnittelupaineilla 3 bar, 12 bar ja 20 bar. Suunnittelupaineita vastaavat koeponnistuspaineet olivat 4,7 bar, 19 bar ja 31,6 bar.



Kuva 24. Esikiristysvoiman muutos paineluokan PN 25 tyyppin 11 kauluslaipalle suunnittelulämpötilalla 200°C ja suunnittelupaineilla 3 bar, 12 bar ja 20 bar. Vastaavat koeponnistuspaineet olivat 4,7 bar, 19 bar ja 31,6 bar.

Kuvasta voidaan huomata, että nimelliskoon DN 200 liitoksilla esikiristysvoima ei muutu suunnittelupaineiden 3 bar ja 12 bar välillä. Tämä johtuu siitä, että molemmilla suunnittelupaineilla ruuvien kuormitustaso muodostui määrääväksi tekijäksi esikiristysvoiman

kannalta. Muissa tapauksissa tarvittavan esikiristysvoiman suuruus kasvoi suunnittelu-paineen kasvaessa. Molemmat tulokset seuraavat oletettua käytöstä.

Toinen oletus perustui siihen, että tarvittavan esikiristysvoiman voidaan olettaa kasvavan tai pysyvän samana laipan nimelliskoon kasvaessa kuormituksen pysyessä ennallaan. Ku-
vassa 25 on esitetty paineluokan PN 10 tyyppin 11 kauluslaipalle määritelty tarvittava esi-
kiristysvoima seitsemälle eri nimelliskoolle välillä DN 50 – DN 1000. Tarkastelu suori-
tettiin suunnittelulämpötilalla 100 °C ja suunnittelupaineella 4 bar, jolloin vastaava koe-
ponnistuspaine oli 5,7 bar.



Kuva 25. Esikiristysvoiman muuttuminen nimelliskoon kasvaessa paineluokan PN 10 tyyppin 11 kauluslaipoilla suunnittelulämpötilalla 100 °C ja suunnittelupaineella 4 bar. Vastaava koeponnistuspaine oli 5,7 bar.

Tulosten voidaan havaita käyttäytyvän oletetulla lailla: molemmilla laskentamenetelmillä määritellyt esikiristysvoimat kasvavat nimelliskoon kasvaessa.

Kolmas oletus ei koskenut esikiristysvoiman määrittelemistä vaan laippaliitosten osien kestävyyttä, jonka voidaan olettaa alenevan lämpötilan noustessa. Vertailulaskennoissa käytetyn koeponnistuspaineen määrittelytavan vuoksi koeponnistuspaine kasvoi lämpötilan funktiona. Tästä syystä vertailulaskennat eivät olleet soveltuvia tämän oletuksen tarkasteluun. Herkkyysanalyysijä tehtäessä suoritettiin tarkasteluja, joissa lämpötila oli ainoa muuttuja. Nämä laskennat osoittivat, että standardiin GOST R 52857.4:2007 perustuvan laskentatavan antamat tulokset käyttäytyvät johdonmukaisesti tämän oletuksen osalta.

7 Laskentatyökalun antamien tulosten vertailu standardin SFS-EN 1591-1:2014 antamiin tuloksiin.

Kuten edellä mainittiin, laskentaohjelman antamia tuloksia verrattiin standardin SFS-EN 1591-1:2014 esittelemän laskentamenetelmän antamiin tuloksiin. Nämä laskelmat suoritettiin vastaavanlaisella, kyseiseen standardiin pohjautuvalla Excel-pohjaisella laskentatyökalulla. Vertailulaskenta oli alkuperäisen suunnitelman mukaan tarkoitus suorittaa laskemalla satunnaisia laippaliitoksia varioimalla paineluokkaa ja liitoksen suunnitteluarvoja (painetta ja lämpötilaa). Muutaman tehdyn vertailulaskelman jälkeen oli havaittavissa, että laskentamenetelmien antamien tulosten keskinäisten erojen suuruus vaihteli riippuen liitokseen kohdistuvan painekuorman suuruudesta. Jotta laskentamenetelmien antamien tulosten keskinäisestä linjasta saataisiin tarkempaa tietoa, päätettiin vertailevaa laskentaa laajentaa systemaattisesti.

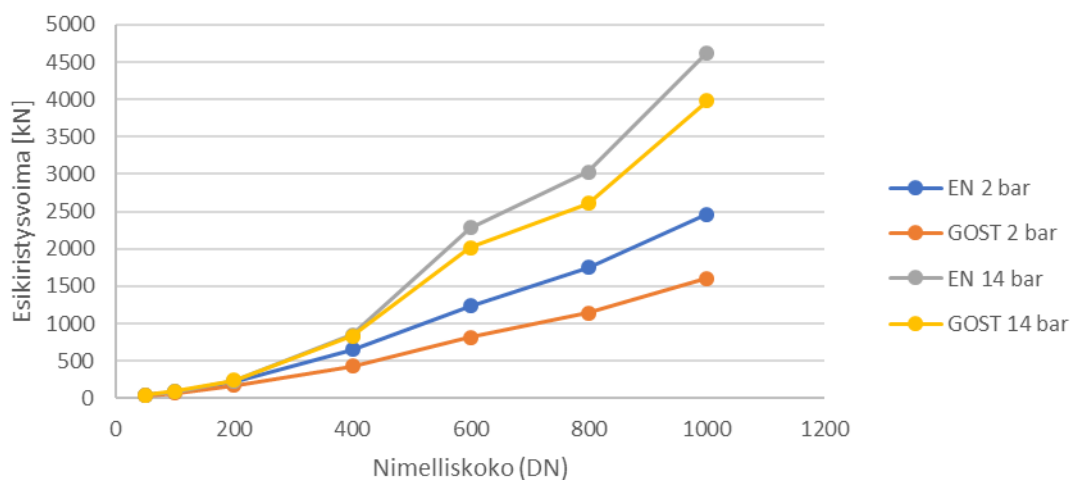
Vertailevaa laskentaa suoritettiin sekä kauluslaipoille että irtolaippa-kaulusrakenteille. Valtaosa vertailevasta laskennasta suoritettiin laippaliitoksille, joihin ei kohdistunut painekuorman ja lämpötilan lisäksi muita kuormituksia. Tämä päätös perustui siihen, että laippaliitoksiin kohdistuvista realistisista ulkoisista kuormituksista eri nimellisko'issa ja paineluokissa ei ollut saatavilla riittävästi tietoa. Epärealistiset ulkoiset kuormat olisivat saattaneet peittää alleen jotain laskentamenetelmien käyttäytymisestä. Ulkoisten kuormitusten vaikutusta tarvittavaan esikivistysvoimaan tarkasteltiin pienemmän otannan avulla. Tämä otanta kattoi sellaiset paineluokat ja nimelliskokoalueet, joihin kohdistuvien kuormitusten suuruuksista löytyi vertailuarvoja todellisista putkistoille suoritetuista analyysistä.

7.1 Kauluslaipparakenteita koskeva vertaileva laskenta

Kauluslaippoja koskeva vertaileva laskenta kattoi paineluokat PN 10 – PN 63. Kutakin paineluokkaa kohden valittiin kolme laskentapainetta, joista yksi oli lähellä nimellispainealueen alarajaa, yksi lähellä nimellispainealueen ylärajaa ja yksi nimellispainealueen keskivaiheilla. Nämä kolme valittua laskentatapausta laskettiin lämpötiloissa 100 °C ja 200 °C. Valitusta laskentapaineesta kaksi pienintä laskettiin myös lämpötilassa 400 °C. Tällöin tiivisteenä oli spiraalikudostiiviste Kempchen Sp2V1. Laskentapaineista suurin olisi laipalle annetun p/t-arvon mukaan selkeästi ylittänyt laipan kuormituksen keston tässä lämpötilassa, joten se päätettiin jättää tarkastelun ulkopuolelle epärealistisuutensa vuoksi.

Vertailevassa laskennassa oli havaittavissa, että standardin SFS-EN 1591-1:2014 mukaan lasketut esikivistysvoimat olivat pääosin suurempia kuin standardin GOST R 52857.4:2007 mukaan lasketut tulokset. Tämä ero kuitenkin pieneni liitokseen kohdistettavan painekuorman kasvaessa ja kääntyi jopa toisin päin. Kuvassa 26 on esitetty tulokset paineluokan PN 16 tyyppin 11 kauluslaipoille tehdyistä laskennoista. Laskennat suoritettiin suunnittelulämpötilalla 100 °C suunnittelupaineiden ollessa 2 bar ja 14 bar. Suunnittelupaineita vastaavat koeponnistuspaineet olivat 2,9 bar ja 20 bar.

Esikiristysvoiman muutos suunnittelupaineilla 2 bar ja 14 bar, PN 16 kauluslaippa (EN 1092-1 tyyppi 11)



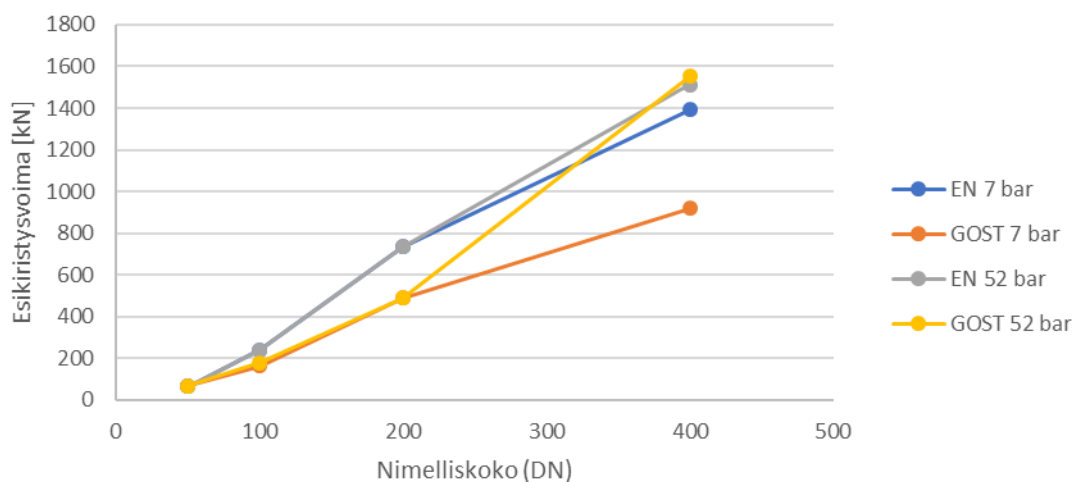
Kuva 26. Esikiristysvoiman muuttuminen paineluokan PN 16 tyyppin 11 kauluslaipoilla suunnittelulämpötilalla 100 °C ja suunnittelupaineilla 2 bar sekä 14 bar. Vastaavat koeponnistuspaineet olivat 2,9 bar ja 20 bar.

Kuvaajista voidaan havaita edellä mainittu ilmiö. Esimerkiksi nimelliskoon DN 800 laipalle laskettujen esikiristysvoimien suhde on 1,58 suunnittelupaineen ollessa 2 bar, mutta enää 1,16 suunnittelupaineen ollessa 14 bar.

Laskettujen esikiristysvoimien suhde pieneni myös lämpötilan noustessa. Korkeampi lämpötila johti käytetyn määrittelytavan mukaan myös korkeampaan koeponnistuspaineeseen, joten suhteen pieneneminen johtui mitä todennäköisimmin ennemminkin suuremmasta koeponnistuspaineesta kuin liitoksen korkeammasta lämpötilasta. Tätä selitystä tukee myös huomio, että vaikutus oli huomattavampi korkeissa laskentapaineissa, jolloin myös koeponnistuspaine oli suhteessa suurempi.

Todennäköisesti juuri edellä mainituista syistä suuremmilla paineluokilla ja suuremmilla suunnittelupaineilla tarvittavat esikiristysvoimat saattoivat olla standardin GOST R 52857.4:2007 mukaan laskettaessa suuremmat kuin standardin SFS-EN 1591-1:2014 mukaan laskettaessa. Kuvassa 27 on esitetty tulokset paineluokan PN 63 tyyppin 11 kauluslaipoille tehdyistä laskennoista. Laskennat suoritettiin suunnittelulämpötilalla 200 °C ja suunnittelupaineilla 7 bar ja 52 bar. Vastaavat koeponnistuspaineet olivat 11,1 bar ja 82,2 bar. Liitoksen tiivisteenä oli spiraalikudostiiviste Kempchen Sp2V1.

Esikiristysvoiman muutos suunnittelupaineilla 7 bar ja 52 bar, PN 63 kauluslaippa (EN 1092-1 tyyppi 11)



Kuva 27. Esikiristysvoiman muuttuminen paineluokan PN 63 kauluslaipalle suunnittelulämpötilalla 200 °C ja suunnittelupaineilla 7 bar ja 52 bar. Vastaavat koeponnistuspaineet olivat 11,1 bar ja 82,2 bar.

Pienimmässä nimelliskoossa DN 50 tulokset ovat käytännössä samat, 67 kN ja 68 kN. Toisen tuloksen perustana on kuitenkin ruuvin pieni kuormitusaste (SFS-EN 1591-1:2014) ja toisen tiivisteen vaatima pienin asettumispaine (GOST R 52857.4:2007). Koska molemmat määrittelyperusteet ovat paineesta riippumattomia, eivät tulokset muuttuneet suunnittelupaineiden välillä. Nimellisko'oissa DN 100 ja DN 200 oli molempien laskentamenetelmien antamien tulosten perusteena ruuvin pienin kuormitusaste. Näistä tuloksista näkyy selkeästi laskentamenetelmien keskinäiset erot tämän kuormitusasteen määrittelyssä. Tuloksista on myös havaittavissa, että mainittu ero johtaa suurempaan eroon tulosten välillä ruuvikoon kasvaessa. Nimelliskoossa DN 400 molempien laskentamenetelmien antamien tulosten perusteena oli ruuvin pienin kuormitusaste suunnittelupaineella 7 bar ja painekuorman vaatima esikiristysvoima suunnittelupaineella 52 bar. Tuloksista voidaan nähdä, että standardin GOST R 52857.4:2007 mukaan määriteltä esikiristysvoima oli korkeammalla suunnittelupaineella hiukan suurempi.

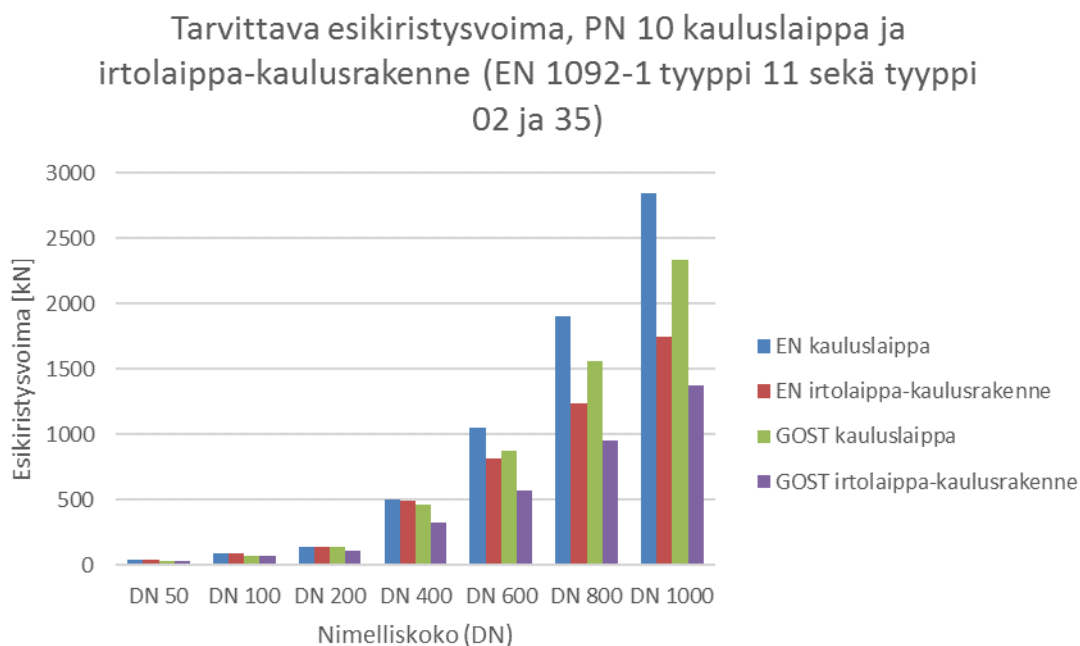
Kuvassa 27 esitetyt tulokset havainnollistavat hyvin vertailulaskennoissa havaittuja ilmiöitä. Samalla esikiristysvoiman määrittelyperusteella saadut tulokset saattoivat poiketa paljonkin toisistaan, kun taas eri määrittelyperustein saadut tulokset samalle liitokselle saattoivat vastata toisiaan. Tulokset korreloivat kuitenkin toistensa kanssa niin, että esikiristysvoimien muuttuminen oli aina saman suuntaista.

7.2 Irtolaippa-kaulusrakenteita koskeva vertaileva laskenta

Irtolaippa-kaulusrakenteiden laippoja koskeva vertaileva laskenta kattoi paineluokat PN 10 – PN 40. Vertaileva laskenta suoritettiin muilta osin vastaavalla tavalla kuin kauluslaippojen kohdalla.

Laskennan tuloksista oli havaittavissa, että irtolaippa-kaulusrakenteelle tarvittava esikiristysvoima oli pienempi kuin kauluslaipalle tarvittava esikiristysvoima. Tämä huomio päti molemmille käytetyille laskentamenetelmille. Kuvassa 28 on esitetty paineluokan

PN 10 kauluslaipalle ja irtolaippa-kaulusrakenteelle tehtyjen vertailulaskentojen tulokset. Tarkastelu suoritettiin suunnittelulämpötilalla 100 °C ja suunnittelupaineella 8 bar, jolloin vastaava koeponnistuspaine oli 11,4 bar.



Kuva 28. Tarvittava esikiristysvoima paineluokan PN 10 eri laippatyypeille suunnittelulämpötilalla 100 °C ja suunnittelupaineella 8 bar. Vastaava koeponnistuspaine oli 11,4 bar.

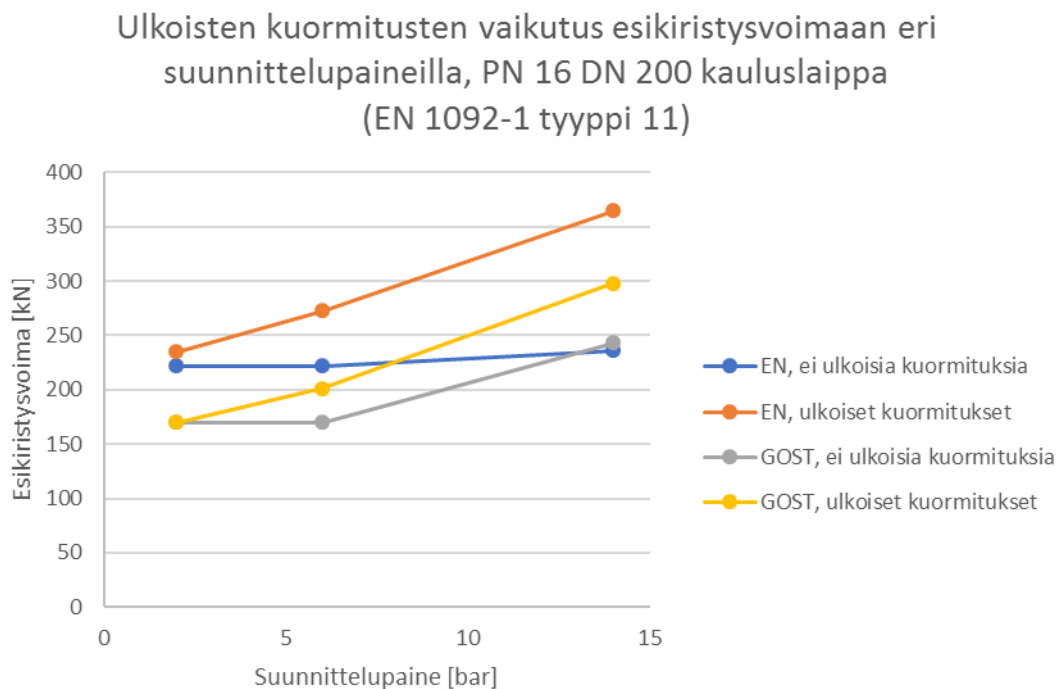
Kuvaajasta on nähtävissä, että ero kahden tarkasteltavan laippatyypin tarvitseman esikiristysvoiman suuruudessa oli huomattava isoissa nimellisko'issa. Tämä päti molemmilla laskentamenetelmillä saatuihin tuloksiin. Nimellisko'issa DN 50 ja DN 100, standardin SFS-EN 1591-1:2014) mukaan laskettaessa myös vielä nimelliskoossa DN 200, oli ruuvien pienin kuormitusaste esikiristysvoiman määrittelyn perusteena. Koska molemmilla laippatyypeillä on yhtä monta yhtä suurta ruuvia samassa nimelliskoossa, ei laipan tyyppi näissä tapauksissa vaikuttanut tarvittavan esikiristysvoiman suuruuteen.

Irtolaippa-kaulusrakenteita koskevissa vertailulaskennoissa huomattiin, että standardin GOST R 52857.4:2007 esittelemä laskentamenetelmä on liian konservatiivinen standardin SFS-EN 1092-1:2018 tyyppin irtolaippa-kaulusrakenteisten laippojen lujuustarkasteiluille. Kaikkien laskettavien irtolaippa-kaulusrakenteisten laippojen käyttökertoimet ylittivät reilusti myös hyvin alhaisilla kuormitustasoilla.

7.3 Vertaileva laskenta ja ulkoiset kuormitukset

Vertailevaa laskentaa ulkoisten kuormitusten vaikutuksesta esikiristysvoiman suuruuteen suoritettiin kauluslaipoille paineluokissa PN 10 ja PN 16. Saatujen tulosten perusteella voidaan karkeasti sanoa, että ulkoisilla kuormilla ei ollut merkittävää vaikutusta esikiristysvoimaan, jos suunnittelupaineen aikaansaama voima ja ulkoisten kuormitusten aiheuttama ekvivalentti voima eivät yhdessä ylittäneet koeponnistuksen painevoimaa. Vaikka ulkoiset kuormitukset eivät vaikuttaisi määriteltyn esikiristysvoimaan on ne kuitenkin huomioitava, koska ne vaikuttavat liitoksen komponenttien kestävytyteen.

Kuvassa 29 on esitetty, kuinka ulkoiset kuormitukset yhdistettynä eri suunnittelupaineisiin vaikuttivat paineluokan PN 16 kokoa DN 200 olevan tyypin 11 kauluslaipan tarvittavaan esikiristysvoimaan. Ulkoinen voima oli suuruudeltaan 4000 N (vetoa) ja ulkoinen momentti suuruudeltaan 6000 Nm. Tarkastelu suoritettiin suunnittelulämpötilalla 100 °C ja suunnittelupaineilla 2 bar, 6 bar ja 14 bar. Vastaavat koeponnistuspaineet olivat 2,9 bar, 8,6 bar ja 20 bar.



Kuva 29. Ulkoisten kuormitusten 4000 N (vetoa) ja 6000 Nm vaikutus esikiristysvoimaan PN 16 tyypin 11 kauluslaipoilla suunnittelulämpötilalla 100 °C ja suunnittelupaineilla 2 bar, 6 bar ja 14 bar. Vastaavat koeponnistuspaineet olivat 2,9 bar, 8,6 bar ja 20 bar.

Kuvasta voidaan huomata, että ulkoisten voimien vaikutus esikiristysvoimaan on suurempi standardin SFS-EN 1591-1:2014 mukaan laskettaessa kuin standardin GOST R 52857.4:2007 mukaan laskettaessa. Tämä ero johtuu mitä todennäköisimmin siitä, että standardin SFS-EN 1591-1:2014 esittelemässä laskentatavassa kasvavan kuormituksen vaikutus tiivisteen kimmokertoimeen kasvattaa vielä omalta osaltaan tarvittavaa esikiristysvoimaa.

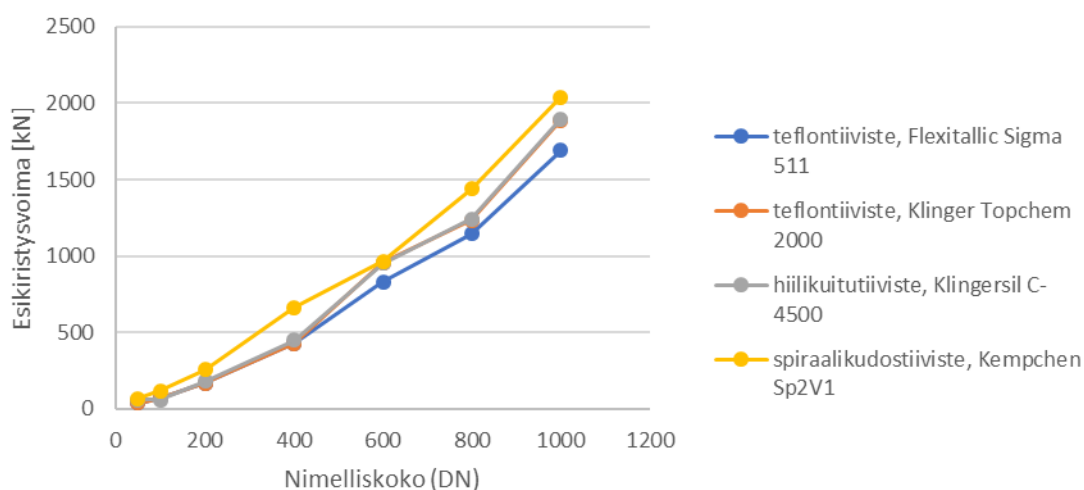
8 Herkkyysanalyysit

Alkuperäistä suunnitelmaa laajempi vertailulaskenta toimi omalta osaltaan herkkyysanalyysinä joidenkin muuttujien, kuten painekuorman ja laipan nimelliskoon osalta. Näiden vertailulaskentojen lisäksi tehtiin rakennetun laskentatyökalun avulla herkkyysanalyysyjä sellaisten tekijöiden vaikutusten tutkimiseksi, jotka jäivät vertailulaskentojen ulkopuolelle.

Yksi kiinnostuksen kohde oli kuinka lämpötila vaikuttaa liitokseen tapauksissa, joissa se on ainoa muuttuja. Luvussa 6 esiteltiin tämän herkkyysanalyysin tulokset liitoksen komponenttien kestävyysosalta. Tämän lisäksi tarkasteltiin myös lämpötilan vaikutusta esikiristysvoimiin. Tarkastelujen antamat tulokset osoittivat, että lämpötilalla oli merkitystä esikiristysvoimiin ainoastaan niissä tapauksissa, joissa käytettävän ruuvimateriaalin lämpölaajenemiskerroin on laippamateriaalien lämpölaajenemiskerrointa suurempi. Tällöin tarvittavan esikiristysvoiman on oltava suurempi kompensoidakseen ruuvien laippoja suuremmasta lämpölaajenemisesta johtuvan liitoksen löystymisen.

Toinen kiinnostava muuttuja esikiristysvoiman kannalta oli liitoksessa käytettävän tiivisteiden vaikutus esikiristysvoiman suuruuteen. Kuvassa 30 on esitetty neljälle eri tiivisteele lasketut esikiristysvoimat paineluokan PN 16 tyyppin 11 kauluslaipalle. Tarkastelut suoritettiin suunnittelulämpötilalla 200 °C ja suunnittelupaineella 6 bar, jolloin vastaava koeponnistuspaine oli 9,5 bar.

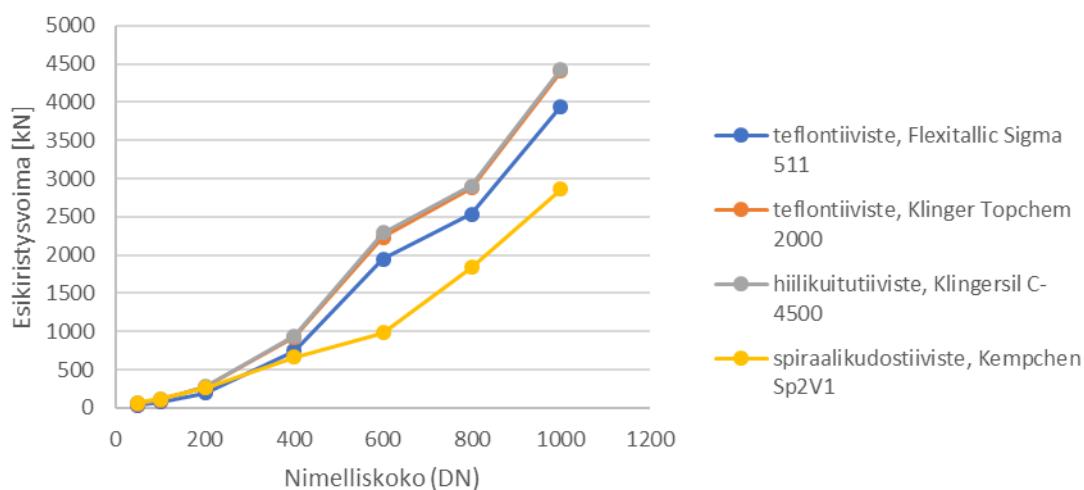
Tiivisteiden vaikutus esikiristysvoimaan suunnittelupaineella
6 bar, PN 16 kauluslaippa (EN 1092-1 tyyppi 11)



Kuva 30. Tiivisteiden vaikutus esikiristysvoimaan paineluokan PN 16 tyyppin 11 kauluslaipalla suunnittelulämpötilassa 200 °C ja suunnittelupaineella 6 bar. Vastaava koeponnistuspaine oli 9,5 bar.

Vertailussa olivat kaksi eri teflonttiivistettä (Klinger Topchem 2000 ja Sigma 511), hiilikuitutiiviste (Klingersil C-4500) ja grafiittitäyteinen spiraalikudostiiviste (Kempchen Sp2V1). Tuloksista on havaittavissa, että spiraalikudostiiviste vaatii suurimman esikiristysvoiman muiden tarkasteltavien tiivisteiden tulosten ollessa suunnilleen samaa suuruusluokkaa. Teflonttiivisteiden Klinger Topchem 2000 ja hiilikuitutiivisteiden Klingersil C-4500 vaativat esikiristysvoimat ovat melkein identtiset. Kuvassa 31 on esitetty samoille liitoksille lasketut esikiristysvoimat samassa lämpötilassa, mutta tällä kertaa suunnittelupaine oli 14 bar ja vastaava koeponnistuspaine 22,1 bar.

Tiivisteiden vaikutus esikiristysvoimaan suunnittelupaineella
14 bar, PN 16 kauluslaippa (EN 1092-1 tyyppi 11)



Kuva 31. Tiivisteiden vaikutus esikiristysvoimaan paineluokan PN 16 tyyppin 11 kauluslaipalla suunnittelulämpötilassa 200 °C ja suunnittelupaineella 14 bar. Vastaava koeponnistuspaine oli 22,1 bar.

Tuloksista on havaittavissa, että teflontiivisteille ja hiilikuitutiivisteelle lasketut esikiristysvoimat noudattavat samaa linjaa kuin aikaisemmassa tarkastelussa. Suurempi laskentapaine johti suurempiin esikiristysvoimiin, kuten oli odotettavissa. Myös spiraalikudostiivisteelle lasketut esikiristysvoimat kasvoivat, mutta olivat nyt suhteessa pienempiä kuin muille tiivisteille lasketut esikiristysvoimat. Tämä selittyy spiraalikudostiivisteiden rakenteella, sen tiivistävä osa on varsinkin suurissa ko'issa kapeampi kuin muilla tarkastelun kohteena olevilla tiivisteillä. Kapeampi tiivistävä osa johtaa kapeampaan teholliseen leveyteen, mikä vaikuttaa esikiristysvoimaan luvussa 4.3 kuvatus mukaisesti. Leveyden vaikutus tarvittavaan esikiristysvoimaan korostuu etenkin suurilla laskentapaineilla, kuten näistä kahdesta tarkastelusta on havaittavissa. Pienemmillä laskentapaineilla spiraalikudostiivisteiden esikiristysvoiman määrääväksi tekijäksi muodostuu asennustilanteen pienin vaadittu pintapaine. Tämä vaadittu pintapaine on spiraalikudostiivisteillä usein merkittävästi suurempi kuin muilla tiivistetyypeillä, mikä on havaittavissa kuvassa 30 esitetyissä tuloksissa.

Ero vaadittavien esikiristysvoimien välillä ei siis johdu pelkästään tiivisteiden materiaalista vaan myös tiivisteiden tiivistävän osan mitoista. Mittaerojen ja liitokseen kohdistettavan korkean kuormituksen yhteisvaikutukseen olisi syytä kiinnittää erityistä huomiota. Kuormituksella tarkoitetaan tässä painekuormaa ja mahdollisia ulkoisia kuormituksia, lämpötila ei vaikuta tiivisteiden pienempään vaadittavaan esikiristysvoimaan. Lämpötilan vaikutusta tiivisteiden kuormituksen kestoon ei tosin pidä unohtaa.

9 Pohdinta

Rakennetun laskentatyökalun avulla suoritettua laskennan havaittiin olevan sen pituudesta huolimatta suhteellisen nopeaa ja vaivatonta. Työkalusta olisi voitu ohjelmoida käyttäjän näkökulmasta lyhyempi. Toteutettu avonainen laskentatapa kaikkine näkyvine välituloksineen oli kuitenkin tietoinen valinta, sillä näin sekä laskentaohjelman käyttäjä että laskennan tarkastaja pystyvät perehtymään myös välituloksiin. Viimeiselle sivulle kootut käyttökertoimet helpottavat tulosten tulkitsemista.

Laskentatyökalua ei rakennettu kattamaan tapauksia, joissa liitos muodostuu kahdesta eri tyyppisestä laipasta. Laskentastandardi itsessään kattaa kuitenkin tällaiset niin kutsutut eripariliitokset. Standardin sisältämät kaavat perustuivat kuitenkin siihen oletukseen, että liitoksen laipat ovat samaa tyyppiä jollei umpilaippa ollut liitoksen toisena osapuolena. Kaavoja ei lähdetty tässä vaiheessa muokkaamaan, valtaosa teollisuudessa käytettävistä laippaliitosrakenteista muodostuvat kahdesta samanlaisesta laipasta ja näin ollen tämän rajoituksen ei katsottu vähentävän laskentaohjelman käyttöarvoa merkittävästi. Laskentatyökalun lähtötietojen syöttöosuus rakennettiin kuitenkin sellaiseksi, että liitoksen laipat ovat toisistaan erillisiä. Täten laskentatyökalun pohjarakenne mahdollistaa sen laajentamisen kattamaan myös eripariliitokset, jos se myöhemmässä vaiheessa katsottaisiin tarpeelliseksi.

Laskentastandardin laskentaosuus ei sisältänyt itse kiristysmomentin määrittelyä. Asennustilanteen kiristysmomentti oli esitetty kaaviomuodossa asennustilanteen ruuvijännityksen ja ruuvikoon funktiona kyseisen standardin informatiivisessa liitteessä J. Asennustilanteen ruuvijännitys määräytyi suurimman tarvittavan ruuvivoiman perusteella. Liite ei sisältänyt tietoja kaavion arvojen laskentaperusteista, joskin kaavion yhteydessä esitettiin kiristysmomentin laskentakaava tapauksille, joissa ruuvin asennustilan jännitystaso oli alhaisempi kuin 120 MPa. Tämä mainittu kaava pohjautui käyttötilanteen ruuvivoimaan, ei kaavion lailla asennustilanteeseen. Käyttötilanteen ruuvivoima ei automaattisesti ole suurin tarvittava ruuvivoima, tästä syystä kaavan ja kaavion välillä oli epäloogisuutta. Myös kaavion ilmoittaman kiristysmomentin yksikkö jäi epäselväksi, se ei sopinut mihinkään järkevältä tuntuvaan yksikköön. Näistä syistä kiristysmomentin määrittely päätettiin toteuttaa perustuen ruuvin geometriaan ja käytettyyn voiteluun. Tämä kiristysmomentin määrittelytapa on yhtenäinen standardin SFS-EN 1591-1:2014 käyttämän määrittelytavan kanssa sillä erotuksella, että standardi SFS-EN 1591-1:2014 ottaa kiristysmomenttia määriteltessään huomioon ruuvin kiristysmenetelmän aiheuttaman hajonnan ruuvivoimissa.

Laskentastandardi GOST R 52857.4:2007 ei ollut kaikilta osin yksiselitteinen. Eräs laskentaosuudessa ollut epäselvä kohta koski ruuvin kuormitusasteen määrittelyn perustana olevaa jännitystä, sillä kaavaan merkitty jännitys puuttui kokonaan standardin lyhenne-luettelosta. Kuormitusasteen määrittelyn perustana päätettiin käyttää asennuslämpötilan sallittua jännitystä. Suunnittelutilanteen sallitun jännityksen käyttäminen olisi johtanut tilanteeseen, jossa ruuvin riittävä kuormitusaste olisi ollut pienempi korkeammissa suunnittelulämpötiloissa. Koska relaxaatio ilmiönä korostuu korkeammissa lämpötiloissa, oli asennustilanteen sallittu jännitys konservatiivisempi valinta.

Edellä mainitun lisäksi laskentastandardi ei varsinaisesti ottanut kantaa siihen, olivatko laskennassa käytetyt tiivistevakiot asennuslämpötilan vaiko suunnittelulämpötilan mukaisia. Tiivisteiden joustavuutta käytettiin sekä yhtälöissä, joissa muiden osien joustavuudet oli määritelty asennuslämpötilan mukaan että yhtälöissä, joissa vastaavat arvot oli

määritelty suunnittelulämpötilan mukaan. Tästä syystä päätettiin laskentatyökalua rakennettaessa määritellä tiivisteiden joustavuus sekä asennuslämpötilassa että suunnittelulämpötilassa. Tällä tavoin kaikki yhtälöissä käytettävät arvot säilyivät johdonmukaisina.

Luvussa 4.3 esitettiin, kuinka standardien esittelemät laskentamenetelmät poikkesivat toisistaan tiivisteiden tehollisen leveyden määrittelytavan osalta. Vertailevan laskennan yhteydessä oli selkeästi havaittavissa, että standardin SFS-EN 1591-1:2014 iteratiivinen menetelmä johti melkein kaikissa laskentatapauksissa kapeampiin tehollisiin leveyksiin. Mitään suoraa johtopäätöstä tämän eron vaikutuksesta esikivistysvoimiin on hankalaa tehdä, koska leveys vaikuttaa liitokseen usealla eri tavalla. Havainto siitä, että standardin GOST R 52857.4:2007 mukaan lasketut esikivistysvoimat olivat suurempia hyvin korkeilla laskentapaineilla viittaisi kuitenkin siihen, että paineen kasvaessa nousee leveyden vaikutus kuormitettavaan pinta-alaan määrääväksi tekijäksi.

Standardin SFS-EN 1591-1:2014 tapa huomioda tiivisteiden kimmokerroin johtaa myös siihen, että liitokseen kohdistuvien kuormitusten muutokset (kuten esimerkiksi lämpötila ja ulkoiset kuormitukset) heijastuvat esikivistysvoimaan. Esimerkiksi lämpötilan muutokset vaikuttavat tiivisteiden kimmokertoimeen ja täten liitoksen joustavuuteen, mikä vuorostaan vaikuttaa tarvittavaan esikivistysvoimaan. Tästä syystä tämän työn yhteydessä saadut tulokset koskien herkkyyksianalyysiä lämpötilan vaikutuksesta esikivistysvoimaan eivät ole sellaisenaan suoraan sovellettavissa standardin SFS-EN 1591-1:2014 esittelemälle laskentatavalle.

Myöskään herkkyyksianalyysin tuloksia koskien tiivisteiden vaikutusta esikivistysvoimaan ei voida suoraan soveltaa SFS-EN 1591-1:2014 mukaiseen laskentamenetelmään. Laskentamenetelmien käyttämät tiivistevakiot poikkeavat niin paljon toisistaan, että nyt tehtyjen laskentojen pohjalta ei voida sanoa kuinka tiivistevalinnat vaikuttavat tarvittavaan esikivistysvoimaan standardilla SFS-EN 1591-1:2014 laskettaessa.

Kuten aikaisemmin mainittiin, perustuu standardissa GOST R 52857.4:2007 esitetty laskentamenetelmä osittain niin kutsuttuun Taylor Forge- menetelmään, joka on konservatiivinen lujoustarkastelun näkökulmasta. Standardin GOST R 52857.4:2007 konservatiivinen lähestymistapa näkyi sekä kauluslaippoja että irtolaippa-kaulusrakenteita laskettaessa. Kauluslaippojen kohdalla tämä ero ei ollut niin selvä, mutta kuitenkin havaittavissa. Irtolaippa-kaulusrakenteiden kohdalla ero oli hyvin huomattava. Sallitut jännitykset ylittyivät jo pienimmillä laskennoissa käytetyillä kuormituksilla. Ylitykset olivat usein niin suuria, että niistä ei pystynyt vetämään mitään johtopäätöksiä tulosten korreloivuudesta laipan lujoustarkastelujen osalta.

Standardin SFS-EN 1092-1:2018 mukaiset irtolaippojen kaulusrakenteet ovat hyvin sijoja verrattuna esimerkiksi standardin GOST R 54432:2011 mukaisiin irtolaippojen kaulusrakenteisiin. Standardin GOST R 52857.4:2007 laskentamenetelmä soveltunee käytettäväksi näiden järeämpien irtolaippojen kaulusrakenteiden laskemiseen, mutta se ei sovellu standardin SFS-EN 1092-1:2018 mukaisten irtolaippa-kaulusrakenteiden lujoustarkasteluille. Ruuvien esikivistysvoiman laskentaosion katsottiin kuitenkin soveltuvan vertailukohteeksi lujoustarkastelun sopimattomuudesta huolimatta.

Standardin GOST R 52857.4:2007 laskentaosuudessa on huomautus, että metallitiivistäitä käytettäessä ei niiden joustavuutta huomioda liitoksen kokonaisjoustavuutta määriteltäessä. Standardin liitteen H taulukossa ei esitetty sallitun puristusjännityksen, virumiskertoimen tai kimmokertoimen arvoja metallitiivistäille eikä spiraalikudostiivistäille.

Metallitiivisteiden osalta tämä on ymmärrettävää edellä mainitusta syystä. Spiraalikudostiivisteiden puuttuvat arvot herättävät pohtimaan, laskeeko standardi myös spiraalikudostiivisteet metallitiivisteiksi, vaikka näin ei ole missään selkeästi ilmaistu. Tässä työssä spiraalikudostiiviste on kuitenkin otettu huomioon liitoksen kokonaisjoustavuudessa, koska spiraalikudostiiviste on katsottu olevan selkeästi joustava elementti metallitiivisteeseen verrattuna. Tämä lähestymistapa johtaa hieman pienempiin esikiristysvoimiin. Standardin GOST R 52857.4:2007 normatiivisessa liitteessä H esitetyt tiivistearvot olivat yllättävän ylimalkaisia esimerkiksi tiivisteiden kimmokerrointen osalta. Laskentaa suoritettaessa huomattiin, että kimmokertoimella ei ollut kovinkaan suurta vaikutusta laskentatulokseen. Voi siis olla, että tarkempien kimmokerrointen määrittelyä ei ole katsottu aiheelliseksi.

Irtolaippa-kaulusrakenteille tarvittavan esikiristysvoiman havaittiin olevan pienempi kuin vastaavan kokoiselle kauluslaipalle tarvittava esikiristysvoima tilanteissa, joissa laskennan lähtökohdat muilta osin vastasivat toisiaan. Pienemmän esikiristysvoiman tarve voidaan olettaa johtuvan irtolaippa-kaulusrakenteisen laipan rakenteesta. Irtolaippa toimii eräänlaisena vipuvartena, jolloin kaulusosien väliin jäävään tiivisteeseen saadaan saman suuruinen puristusaine pienempää esikiristysvoimaa käyttämällä. Kauluslaipalle määriteltäessä esikiristysvoimaa sovellettaessa irtolaippa-kaulusrakenteeseen on vaarana, että laippa kiertyy liikaa. Laippojen liiallinen kiertyminen voi johtaa vuotavaan liitokseen. Tästä syystä laipan tyyppi täytyisi ottaa huomioon kiristysmomentteja määriteltäessä.

Laskettuja standardin SFS-EN 1591-1:2014 mukaisia kiristysmomentteja verrattiin myös standardin PSK 6403:2011 esittämiin kiristysmomenttien arvoihin. Tulokset eivät olleet kaikilta osin vertailukelpoisia, koska laskentalämpötilat, tiivisteet ja ruuvimateriaalit vastasivat vai joissain tapauksissa toisiaan. Tämän lisäksi standardin PSK 6403:2011 kiristysmomenttien määrittelyissä oli myös otettu tietyn suuruiset ulkoiset kuormitukset huomioon. Tässä työssä saadut tulokset ja standardin PSK 6403:2011 esittelemät arvot eivät pääosin vastanneet toisiaan. Tulosten eroavaisuuden voidaan olettaa johtuvan useista eri tekijöistä. Jo mainittujen laskentaperusteiden eroavaisuuksien lisäksi käytetty standardiversio ja laskennan suorittaja voivat vaikuttaa tuloksiin. Standardin PSK 6403:2011 tulokset perustuivat standardin SFS-EN 1591-1 vuoden 2009 versioon, kun tässä työssä tehdyt laskennat perustuvat samaisen standardin vuoden 2014 versioon. Näiden standardiversioiden eroavaisuuksien merkityksestä laskentatuloksiin ei ole tarkkaa tietoa, mutta sen vaikutusta ei voida myöskään sulkea pois. Standardien esittelemä iteratiivinen laskentamenetelmä aiheuttaa myös sen, että iteroinnin tekijä saattaa omalla menettelyllään vaikuttaa tuloksiin.

Standardin SFS-EN 1591-1:2014 mukaan laskettaessa havaittiin myös, että joidenkin liitosten kohdalla laippojen sallitut jännitykset ylittyivät, vaikka valitut suunnittelujännitykset olivat standardin SFS-EN 1092-1:2018 liitteen G antamien sallittujen kuormitusten rajoissa. Tämä havainto tuki standardissa PSK 6403:2011 esitettyä huomiota vastaavasta seikasta. Standardissa SFS-EN 1092-1:2018 esitettyjä p/t-arvoja olisi siis hyvä pitää ainoastaan suuntaa antavana.

Pienten paineluokkien ja alhaisten laskentapaineiden kohdalla esikiristysvoiman määrääväksi tekijäksi nousi usein ruuvien pienin kuormitusaste. Tämän kuormitusasteen suuruuden perustuessa ruuvien asennustilanteen suunnittelujännitykseen, nousi se standardilla SFS-EN 1591-1:2014 laskettaessa ruuvien suuremman suunnittelujännityksen myötä usein määrääväksi myös hieman korkeammilla laskentapaineilla. Koska kuormitusasteeseen

vaikuttaa ruuvien lujuus, ei yhdellä ruuvimateriaalilla määriteltyjä kiristysmomentin arvoja voida käyttää muille ruuvimateriaaleille, jos näiden lujuudet poikkeavat huomattavasti toisistaan.

Kuten luvussa 4.3 mainittiin, oli standardin GOST R 52857.1:2007 mukaiset suunnittelujännityksen määräytymisperusteet suurelta osin yhteneväiset eurooppalaisten suunnittelustandardien kanssa. Tästä syystä ei katsottu aiheelliseksi luoda laippojen ja putken suunnittelujännitysten määrittelemiseksi mitään erillistä laskentalomaketta. Huomautuksena mainittakoon kuitenkin koeponnistustilanteen suunnittelujännityksen määräytymisessä olevat erot. Eurooppalaiset suunnittelustandardit käyttävät varmuuskerrointa 1,05 kaikille koeponnistustilanteille, kun taas standardi GOST R 52857.1:2007 käyttää nestepainekokeelle varmuuskerrointa 1,1 ja kaasupainekokeelle varmuuskerrointa 1,2. Tämä on hyvä huomioida tilanteissa, joissa koeponnistustilanteen käyttökertoimet ovat lähellä sallittua rajaa.

10 Yhteenveto

Diplomityössä luotiin standardiin GOST R 52857.4:2007 perustuva laskentatyökalu laippaliitosten lujuustarkastelulle ja kiristysmomenttien määrittämiselle. Laskentatyökalun antamat tulokset verifioitiin käsin laskemalla sekä tarkastamalla, että tulokset noudattelivat tiettyjä laippaliitoksia koskevia perusoletuksia. Laskentatyökalun antamien tulosten havaittiin käyttäytyvän johdonmukaisesti.

Laskentatyökalulla määriteltäviä pienimpiä tarvittavia esikiristysvoimia verrattiin standardin SFS-EN 1591-1:2014 mukaan määriteltäviin esikiristysvoimiin. Laskentatyökalun antamien tulosten havaittiin olevan pääsääntöisesti alhaisempia suhteellisen eron pienentyessä liitokseen kohdistettavan kuormituksen kasvaessa. Suurilla painekuormilla tulokset saattoivat kääntyä toisin päin. Laskentastandardilla oli erilainen lähestymistapa muun muassa tiivisteen vaikutuksesta liitoksen joustavuuteen, laskennassa käytettävään tiivisteen leveyteen sekä ruuvien pienimmän kuormitusasteen määrittelyyn. Nämä selittävät osittain eroavaisuudet tuloksissa.

Laskentatyökalulla suoritettiin myös herkkyysanalyysijä lämpötilan ja tiivisteen tyyppin vaikutuksesta tarvittavan esikiristysvoiman suuruuteen. Lämpötilan havaittiin vaikuttavan esikiristysvoiman suuruuteen ainoastaan silloin, jos ruuvimateriaalin lämpölaajenemiskerroin oli liitoksen muiden osien lämpölaajenemiskerrointa suurempi. Tiivistetyypin havaittiin vaikuttavan tarvittavaan esikiristysvoimaan etenkin spiraalikudostiivisteitä ja muita tiivisteitä verrattaessa. Vaikutuksen suuruuteen ja suuntaan vaikutti liitokseen kohdistettavan painekuorman suuruus. Herkkyysanalyysien antamat tulokset koskien lämpötilan ja tiivisteen vaikutusta tarvittavan esikiristysvoiman suuruuteen eivät ole suoraan sovellettavissa standardin SFS-EN 1591-1:2014 mukaan lasketuille esikiristysvoimille laskentamenetelmien erilaisen lähestymistavan vuoksi.

Laskentatyökalun havaittiin pituudestaan huolimatta olevan nopea ja helppokäyttöinen ja sopisi tästä syystä sarjatyökaluksi. Laskentatyökalulla saatujen tulosten merkittävä ero verrattuna standardin SFS-EN 1591-1:2014 mukaan laskettuihin tuloksiin ei kuitenkaan tee siitä järkevää valintaa kiristysmomenttien määrittelyyn todellisissa projekteissa. Tuloksia verrattaessa havaittu samansuuntainen käyttäytyminen mahdollistaa kuitenkin laskentatyökalun käytön tutkittaessa painekuormituksen vaikutusta tarvittavan esikiristysvoiman suuruuteen.

Vertailevan laskennan yhteydessä havaittiin, että irtolaippa-kaulusrakenteisten laippojen tarvittava esikiristysvoima on huomattavasti pienempi verrattaessa vastaavan paineluokan kauluslaippaan liitokseen vaikuttavan kuormituksen ollessa yhtä suuri. Kauluslaipalle määritelty esikiristysvoima saattaa aiheuttaa irtolaippa-kaulusrakenteen liiallisen kiertymisen ja täten vuotamisen, kun taas irtolaippa-kaulusrakenteelle määritelty esikiristysvoima ei välttämättä riitä pitämään kauluslaippaliitosta tiiviinä. Laippaliitoksen tyyppi olisi siis aina syytä huomioida kiristysmomenttia määriteltäessä.

Standardin GOST R 52857.4:2007 havaittiin olevan lujuustarkastelun osalta konservatiivisempi. Irtolaippa-kaulusrakenteisten liitosten osalta jopa niin konservatiivinen, että sen todettiin olevan täysin sopimaton standardin SFS-EN 1092-1:2018 mukaisten irtolaippa-kaulusrakenteiden lujuustarkasteluun.

Tulevaisuudessa olisi suositeltavaa tarkastella myös sellaisten liitosten tarvittavaa esikiristysvoimaa, jossa toinen laipoista on irtolaippa-kaulusrakenteinen laippa ja toinen laipoista kauluslaippa. Näin saataisiin enemmän tietoa laippojen tyypin vaikutuksesta tarvittavaan esikiristysvoimaan. Tässä työssä tehdyn kaltaisia herkkyyksianalyysijä olisi myös hyödyllistä suorittaa standardin SFS-EN 1591-1:2014 esittelemällä laskentamenetelmällä, jotta saataisiin tarkempaa tietoa eri muuttujien vaikutuksesta kiristysmomenttiin. Jos näiden herkkyyksianalyysien huomattaisiin noudattelevan tässä työssä tehtyjen herkkyyksianalyysien tuloksia, voitaisiin nyt luodun laskentatyökalun käyttöä laajentaa myös vastaavanlaisten tarkastelujen apuvälineeksi.

Standardia PSK 6403:2011 olisi suositeltavaa päivittää ruuvimateriaalien osalta, ottaen huomioon niiden vaikutuksen tarvittavan esikiristysvoiman suuruuteen. Standardissa olisi myös syytä huomioida liitoksen tyypin vaikutus tarvittavaan kiristysmomenttiin. Edellä mainittujen herkkyyksianalyysien avulla voisi olla mahdollista määritellä kertaalleen lasketulle kiristysmomentille käyttöalue, joka ulottuisi esimerkiksi lämpötilan tai tiivisteiden osalta laajemmalle kuin juuri laskennassa käytettyihin arvoihin.

Lähdeluettelo

Abid, M., Khan, N. B. 2010. Stamina of a gasketed flange joint under combined internal pressure and axial loading. 10th Biennial ASME Conference on Engineering systems Design and Analysis (ESDA). s. 73-80. Istanbul, Turkki. 12-14.7.2010. [viitattu 1.4.2019]. DOI: 10.1115/ESDA2010-24206

Abid, M., Nash, D. H. 2005. Structural strength: Gasketed vs non-gasketed flange joint under bolt up and operating condition. International Journal of Solids and Structure 43 (2006), 4616-4629. Elsevier Ltd. [viitattu 1.4.2019]. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2005.06.708

ASME B16.5. 2003. Pipe flanges and flanged fittings nps ½ through nps 24 metric/inch standard. U.S.A: The American Society of Mechanical Engineers. 174 s.

ASME Section VIII Division 1. 2015. Rules for constructions of pressure vessels. U.S.A: The American Society of Mechanical Engineers. 991 s.

Baylac, G., Koplewicz, D. (toim.). 2004. EN 13445 “Unfired pressure vessels” Background to the rules in Part 3 Design. Courbevoie: Union de Normalisation de la Mécanique. 146 s.

Bickford, J. H, 1990. An introduction to the design and behavior of bolted joints. 2nd edition. New York, USA: Marcel Dekker INC. 709 s. ISBN: 0-8247-8167-8

Bouزيد, H. A., Beghou, H. 2003. The Design of Flanges Based on Flexibility and Tightness. [viitattu 5.10.2018]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/267608948_The_Design_of_Flanges_Based_on_Flexibility_and_Tightness

Cardan Engineering Projects LLP. Process Piping. [viitattu 6.1.2019]. Saatavissa: <http://cardanengineering.com/>.

FSA Gasket Handbook. 2017. Verkkodokumentti. European Sealing Association. [viitattu 9.3.2018]. Saatavissa: <https://europeansealing.com/en/flange-gaskets-publications>.

GOST R 52857.1. 2007. Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculations. General requirements. Moskova: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. 27 s.

GOST R 52857.4. 2007. Vessels and Apparatuses. Norms and methods of strength calculations. Strength and leak-tightness calculation of flange joints. Moskova: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. 45 s.

GOST R 54432. 2011. Flantsy armatury, sojeditelnyh tšastei i truboprovodov na nominalnoje davlenije ot PN 1 do PN 200. Konstruktsija, razmery i obštšije tehničeskije trebovanija. [Flanges for valves, fittings, and pipelines for pressure from PN 1 to PN 200. Design, dimensions and general technical requirements] Moskova: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. 89 s.

Gribov, D. 2019. Re:Standard GOST R 52857.4 and standard GOST 34233.4. Sähköpositiivesti. Vastaanottaja: Pia Vuorela. 2.4.2019.

HardHat Engineer. [viitattu 14.1.2019]. Saatavissa: <https://hardhatengineer.com/what-is-a-gasket-types-of-gaskets/>

Huitt, W.M., Chohey, N. P. (toim) 2007. Piping Design, Part 2- Flanges. Chemical Engineering. March 2007. s. 56 – 61.

Kasprzyk, J. 2013. What is the impact of flange finish on gasket performance? European sealing Association. Kolumni. [viitattu 26.3.2019]. Saatavissa: <https://european-sealing.com/en/publications/valve-world-publications>.

Labre, B. 2014. Effect of temperature on bolted flange assemblies. European sealing Association. Kolumni. [viitattu 22.4.2018]. Saatavissa: <https://europeansealing.com/en/publications/valve-world-publications>.

Lund Jepsen, K., Grumsen, P. 2014. Failed austenitic SS bolts in valves. European sealing Association. Kolumni. [viitattu 27.3.2019]. Saatavissa: <https://european-sealing.com/en/publications/valve-world-publications>.

Modern Flange Design. 1950. Bulletin 502. 3rd ed. Chicago: Taylor Forge & Pipe Works. 47 s.

Mohinder, L. N. (toim). 1999. Piping Handbook. 7th edition. McGraw-Hill Handbooks. USA: McGraw-Hill. 2256 s. ISBN 0-07-047106-1

Parisher, R. A., Rhea, R. A. 2012. Pipe Drafting and Design. 3rd edition. Waltham, Mass.: Elsevier. [viitattu 27.3.2019]. Saatavissa: <https://aalto.finna.fi>

Pronk, D. 2017. Choosing between various types of gasket materials. European sealing Association. Kolumni. [viitattu 26.3.2019]. Saatavissa: <https://european-sealing.com/en/publications/valve-world-publications>.

PSK 4232. 2017. Putkiluokka E10H1A painelaitekäyttöön. Austeniittinen ruostumaton CrNi- teräs. 3. painos. Helsinki: PSK Standardisointi. 19 s.

PSK 6401. 2012. Teollisuuden putkistot ja laitteet. Tasotiivisteiden valinta laippaliitoksessa. 2. painos. Helsinki: PSK Standardisointi. 11 s.

PSK 6403. 2011. Teollisuuden putkistot ja laitteet. Laippaliitosten ruuvien kiristysmomentit. Helsinki: PSK Standardisointi. 22 s.

SFS-EN 1092-1. 2018. Flanges and their joints. Circular flanges for pipes, valves, fittings and accessories, PN designated. Part 1: Steel flanges. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto 148 s.

SFS-EN 1514-1. 1997. Laipat ja yhteet. PN-mitoitettujen laippojen tiivisteiden mitat. Osa 1: Ei-metalliset tasotiivisteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 27 s.

SFS-EN 1514-2. 2014. Flanges and their joints. Gaskets for PN-designated flanges. Part 2: Spiral wound gaskets for use with steel flanges. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 16 s.

SFS-EN 1591-1. 2014. Flanges and their joints. Design rules for gasketed circular flange connection. Part 1: Calculation. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 76 s.

SFS-EN 1591-4. 2013. Flanges and their joints. Part 4: Qualification of personnel competency in the assembly of the bolted connections of critical service pressurized systems. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 18 s.

SFS-EN 10220. 2003. Saumattomat ja hitsatut teräsputket. Mitat ja pituusmassat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 15 s.

SFS-EN 13445-3. 2014. Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 3: Suunnittelu. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 785 s.

SFS-EN 13480-3. 2017. Metalliset teollisuusputkistot. Osa 3: Suunnittelu ja laskenta. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 330 s.

SFS-EN 13480-5. 2017. Metalliset teollisuusputkistot. Osa 5: Tarkastus ja testaus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 30 s.

SFS-EN 13555. 2014. Flanges and their joints. Gasket parameters and test procedures relevant to the design rules for gasketed circular flange connections. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 34 s.

Will, A. 2015. Compression and recovery. European sealing Association. Kolumni. [viitattu 29.4.2018]. Saatavissa: <https://europeansealing.com/en/publications/valve-world-publications>.

Zeuss, R. 2012. Determination of bolt torque for flanged connections. European sealing Association. Kolumni. [viitattu 26.3.2019]. Saatavissa: <https://european-sealing.com/en/publications/valve-world-publications>.



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LÄHTÖTIEDOT

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

TARKASTELTAVA LAIPPALIITOS

Laippa

Laippa / olake

P250GH (SFS-EN 10222-2:2017)

Seostamattomat ja vähän s. teräkset

Irtolaippa

Seostamattomat ja vähän s. teräkset

Vastalaippa

Laippa /olake

P250GH (SFS-EN 10222-2:2017)

Seostamattomat ja vähän s. teräkset

Irtolaippa

Seostamattomat ja vähän s. teräkset

Muut osat

Ruuvi

25CrMo4 (SFS-EN 10269:2013)

Seostamattomat ja vähän s. teräkset

Liittyvä vaippa/putki

Välivaruste

Tiiviste

hiilikuitu, Klingersil C 4500

Nimelliskoko

DN 200

Nimellispaine

PN 10

Laipan standardi/tyyppi/numero

11

EN 1092-1 Kauluslaippa tyyppi 11

Vastalaipan standardi/tyyppi/numero

11

EN 1092-1 Kauluslaippa tyyppi 11

Koeponnistuspaine

$P^K = 1,26$ MPa

Suunnittelupaine

$P^S = 0,80$ MPa

Asennuslämpötila

$T^A = 20$ °C

Koeponnistuslämpötila

$T^K = 20$ °C

Suunnittelulämpötila

$T^S = 200$ °C

Liitokseen kohdistuvat ulkoiset kuormitukset

[Veto plussaa, puristus miinusta](#)

ASENNUSTILANNE (A)

KOEPONNISTUSTILANNE (K)

SUUNNITELUTILANNE (S)

Aksiaalivoima (K)

$F_A^K =$ kN

Taivutusmomentti (K)

$M_A^K =$ Nm

Aksiaalivoima (S)

$F_A^S = -3$ kN

Taivutusmomentti (S)

$M_A^S = 5000$ Nm

Liitosten osien lämpötila suunnittelutilanteessa

[Kaikissa kohdissa oletuksena aiemmin ilmoitettu suunnittelulämpötila, muuta tarvittaessa](#)

Laippa

Laipan (kauluksen) keskimääräinen lämpötila

$t_{F1} = 200$ °C

Irtolaipan keskimääräinen lämpötila

$t_{L1} = 200$ °C

Vastalaippa

Laipan (kauluksen) keskim. lämpötila (vastalaippa)

$t_{F2} = 200$ °C

Irtolaipan keskimääräinen lämpötila (vastalaippa)

$t_{L2} = 200$ °C

Muut osat

Ruuvien keskimääräinen lämpötila

$t_B = 200$ °C

Välivarusteen keskimääräinen lämpötila

$t_C =$ °C



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LÄHTÖTIEDOT

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

MATERIAALITIEDOT:

Liitoksen osien lujuusarvot eri kuormitustilanteissa

Ruuvimateriaalin arvot voi määrittellä välilehden 'Ruuvin laskentalujuus' avulla.

Laippa (kaulus)

Laipan (kauluksen) suunnittelujännitys (A)	$\sigma_{F1}^A =$	160 MPa
Laipan (kauluksen) suunnittelujännitys (K)	$\sigma_{F1}^K =$	228 MPa
Laipan (kauluksen) suunnittelujännitys (S)	$\sigma_{F1}^S =$	116 MPa

Irtolaippa

Irtolaipan suunnittelujännitys (A)	$\sigma_{L1}^A =$	MPa
Irtolaipan suunnittelujännitys (K)	$\sigma_{L1}^K =$	MPa
Irtolaipan suunnittelujännitys (S)	$\sigma_{L1}^S =$	MPa

Vastalaippa (kaulus)

Laipan (kauluksen) suunnittelujännitys, vastal. (A)	$\sigma_{F2}^A =$	160 MPa
Laipan (kauluksen) suunnittelujännitys, vastal. (K)	$\sigma_{F2}^K =$	228 MPa
Laipan (kauluksen) suunnittelujännitys, vastal. (S)	$\sigma_{F2}^S =$	116 MPa

Vastalaippa (irtolaippa)

Irtolaipan suunnittelujännitys, vastalaippa (A)	$\sigma_{L2}^A =$	MPa
Irtolaipan suunnittelujännitys, vastalaippa (K)	$\sigma_{L2}^K =$	MPa
Irtolaipan suunnittelujännitys, vastalaippa (S)	$\sigma_{L2}^S =$	MPa

Muut osat

Ruuvin nimellinen sallittu jännitys (A)	$\sigma_{B, \text{nim}}^A =$	157 MPa
Ruuvin nimellinen sallittu jännitys (K)	$\sigma_{B, \text{nim}}^K =$	157 MPa
Ruuvin nimellinen sallittu jännitys (S)	$\sigma_{B, \text{nim}}^S =$	147 MPa

Liittyvän putken suunnittelujännitys (A)

 $\sigma_P^A =$ MPa

Liittyvän putken suunnittelujännitys (K)

 $\sigma_P^K =$ MPa

Liittyvän putken suunnittelujännitys (S)

 $\sigma_P^S =$ MPa

Oleellinen levylaipoilla,
muuten informatiivinen tieto

KIMMOKERTOIMET

Liitoksen osien kimmokertoimet eri kuormitustilanteissa

Laippa (kaulus)

Laipan (kauluksen) kimmokerroin (A)	$E_{F1}^A =$	211800 MPa
Laipan (kauluksen) kimmokerroin (K)	$E_{F1}^K =$	211800 MPa
Laipan (kauluksen) kimmokerroin (S)	$E_{F1}^S =$	198600 MPa

Irtolaippa

Irtolaipan kimmokerroin (A)	$E_{L1}^A =$	0 MPa
Irtolaipan kimmokerroin (K)	$E_{L1}^K =$	0 MPa
Irtolaipan kimmokerroin (S)	$E_{L1}^S =$	0 MPa



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LÄHTÖTIEDOT

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Vastalaippa (kaulus)

Laipan (kauluksen) kimmokerroin, vastalaippa (A)	$E_{F2}^A =$	211800 MPa
Laipan (kauluksen) kimmokerroin, vastalaippa (K)	$E_{F2}^K =$	211800 MPa
Laipan (kauluksen) kimmokerroin, vastalaippa (S)	$E_{F2}^S =$	198600 MPa

Vastalaippa (irtolaippa)

Irtolaipan kimmokerroin, vastalaippa (A)	$E_{L2}^A =$	0 MPa
Irtolaipan kimmokerroin, vastalaippa (K)	$E_{L2}^K =$	0 MPa
Irtolaipan kimmokerroin, vastalaippa (S)	$E_{L2}^S =$	0 MPa

Muut osat

Ruuvien kimmokerroin (A)	$E_B^A =$	211800 MPa
Ruuvien kimmokerroin (K)	$E_B^K =$	211800 MPa
Ruuvien kimmokerroin (S)	$E_B^S =$	198600 MPa

LÄMPÖLAAJENEMISKERTOIMET

Liitosten osien lämpölaajenemiskertoimet suunnittelutilanteessa

Laippa

Laippa / olake	$\alpha_{F1} =$	1,26E-05 °C-1
Irtolaippa	$\alpha_{L1} =$	0 °C-1

Vastalaippa

Laippa / olake	$\alpha_{F2} =$	1,26E-05 °C-1
Irtolaippa	$\alpha_{L2} =$	0 °C-1

Ruuvi

$$\alpha_B = 1,26E-05 \text{ °C-1}$$

Välivaruste (esim. venttiili)

$$\alpha_C = 1,26E-05 \text{ °C-1}$$

LIITTYVÄN PUTKEN MITAT JA KORROOSIOVARA

Putken ulkohalkaisija	$D_p =$	219,1 mm
Putken seinämänpaksuus	$e_s =$	6,3 mm

Tässä määritetty korroosiovara huomioidaan ainoastaan laippoihin muodostuvia jännityksiä laskettaessa. Korroosiovara vähennetään niistä osista laippaa, jotka ovat virtaavan aineen kanssa kosketuksissa.

Korroosiovara $c =$ 1 mm



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LÄHTÖTIEDOT

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

LAIPAN MITAT

Kiinteän laipan laippareenkaan tai irtolaipparakenteen kauluksen tiedot

Laipan tyyppi	$F_{typ1} =$	0	$F_{typ1} = 0$, kauluslaippa ; 1, irtolaipparakenteen ; 2, levylaippa			
Laipan ulkohalkaisija	$D_{F1} =$	340	mm			
Kauluksen (olakkeen) ulkohalkaisija	$D_{H1} =$		mm			
Laipan tai kauluksen (olakkeen) sisähalkaisija	$d_{H1} =$	206,5	mm			
Kauluksen (olakkeen) ja irtolaipan uloin kontaktihalk.	$D_{S1} =$		mm		viiste huomioitava tarvittaessa	
Laipan tiivistepinnan ulkohalkaisija	$D_{FG1} =$	268	mm			
Laipan tiivistepinnan sisähalkaisija	$d_{FG1} =$	206,5	mm			
Jakoympyrän halkaisija	$D_{jako1} =$	295	mm			
Nimellinen paksuus	$h_1 =$	24	mm		sisältää mahdolliseen korokeosan	

Laipan tai kauluksen (olakkeen) kaulusosan tiedot:

Kauluksen korkeus	$l_1 =$	22	mm
Ohuen pään minimipaksuus	$S_{0,1} =$	6,3	mm
Paksumman pään minimipaksuus	$S_{1,1} =$	13,75	mm

Irtolaipan tiedot:

Ulkohalkaisija	$D_{L1} =$		mm
Sisähalkaisija	$d_{L1} =$		mm
Lämpölaajeneva paksuus	$h_{L1} =$		mm

VASTALAIPAN MITAT:

Kiinteän laippareenkaan tai kauluksen (olakkeen) tiedot:

Laipan tyyppi	$F_{typ2} =$	0	$F_{typ2} = 0$, samanlainen; $F_{typ2} = 1$ umpilaippa			
Laipan ulkohalkaisija	$D_{F2} =$	340	mm			
Kauluksen (olakkeen) ulkohalkaisija	$D_{H2} =$		mm		viiste huomioitava tarvittaessa	
Laipan tai kauluksen (olakkeen) sisähalkaisija	$d_{H2} =$	206,5	mm			
Laipan tiivistepinnan ulkohalkaisija	$D_{FG2} =$	268	mm			
Laipan tiivistepinnan sisähalkaisija	$d_{FG2} =$	206,5	mm			
Jakoympyrän halkaisija	$D_{jako2} =$	295	mm			
Nimellinen paksuus	$h_2 =$	24	mm		sisältää korokeosan	

Laipan tai kauluksen (olakkeen) kaulusosan tiedot:

Kauluksen korkeus	$l_2 =$	22	mm
Ohuen pään minimipaksuus	$S_{0,2} =$	6,3	mm
Paksumman pään minimipaksuus	$S_{1,2} =$	13,75	mm

Irtolaipan tiedot:

Ulkohalkaisija	$D_{L2} =$		mm
Sisähalkaisija	$d_{L2} =$		mm
Lämpölaajeneva paksuus	$h_{L2} =$		mm



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LÄHTÖTIEDOT

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Umpilaippa:

Umpilaipan ulkohalkaisija $D_x =$ mm
Umpilaipan paksuus $h_c =$ mm
Umpilaipan laipoitetun osan paksuus $\delta_c =$ mm

Laippojen väliin sijoitettu varuste

Välivarusteen paksuus $h_p =$ mm

RUUVIT JA TIIVISTE

Laskentaohjelma soveltuu käytettäväksi vain tasotiivisteille

Tiivisteen mittatiedot

Sisähalkaisija $d_G =$ 220 mm
Ulkohalkaisija $D_G =$ 273 mm
Paksuus $e_G =$ 2 mm

Ruuvien tyyppi $B_{typ} =$ 0 $B_{typ}=0$, ruuvi; $B_{typ}=1$, vaarnaruuvi
Ruuvien lukumäärä $n_B =$ 8 kpl
Ruuvien nimelliskoko (Mxx) $d_{B0} =$ 20 mm
Ruuvien kaulan tai ohennetun osan halkaisija $d_{Bs} =$ 18,4 mm

Ruuvien nousu $p_t =$ 2,5 mm
Kierteen profiilin puolikulma $\alpha =$ 30,0 °
Ruuvien sydänhalkaisija $d_{B3} =$ 16,9 mm
Ruuvien tehollinen halkaisija $d_{Be} =$ 17,7 mm
Ruuvien kylkihalkaisija $d_{B2} =$ 18,4 mm
Mutterin kosketuspinnan halkaisija $d_n =$ 26,0 mm
Ruuvien plastinen vääntövästus $W_B =$ 1441 mm³
Ruuvien joustopituus $L_{B0} =$ 50 mm
Ruuvien tehollinen pituus $L_B =$ 55,6 mm
Ruuvien minimipoikkipinta-ala $A_{Bmin} =$ 225,19 mm² (1.2)

Ruuviliitoksen asennusparametrit:

0=kontrolloimaton kiristys; 1=kontrolloitu (momentti); 2=kontrolloitu (ruuvien venyminen)

Kiristuksen kontrollointi $B_{cont} =$ 1
Kierteen kitkakerroin $\mu_t =$ 0,17
Kitkakerroin mutterin tai ruuvien kannan alla $\mu_n =$ 0,17

Tiivistevakiot

Asennustilanteessa

Pienin vaadittu puristusjännitys $q_{min} =$ 25 MPa
Suurin sallittu puristusjännitys $q_{max}^A =$ 200 MPa
Virumiskerroin $P_{QR}^A =$ 0,94 Syötä metallitiivisteelle $P_{QR}=0$
 $E_G^A =$ 1144 MPa

Suunnittelutilanteessa

Suurin sallittu puristusjännitys $q_{max}^S =$ 200 MPa
Virumiskerroin $P_{QR}^S =$ 0,81 Syötä metallitiivisteelle $P_{QR2}=0$
Kimmokerroin $E_G^S =$ 1735 MPa

Tiivistevakio $m =$ 4



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LÄHTÖTIEDOT

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

LASKENTAOSUUS

Laskentamenetelmää voidaan käyttää, jos seuraavat ehdot toteutuvat:

	Laippa		Vastalaippa		
$\frac{D_F}{d_F} \leq 5$	1,65	OK	1,65	OK	(1)
$\frac{2 * h}{D_F - d_F} \geq 0.25$	0,36	OK	0,36	OK	(2)
$\frac{S_1 - S_0}{l} \leq 0.4$	0,34	OK	0,34	OK	(3)

Tarvittava tiivistevoima (5.1 - 5.3)

Tiivisteiden leveys $b_G = 24 \text{ mm}$

Tiivisteiden tehollinen leveys (4), (5) & (6)

$$\left. \begin{aligned} b_{Ge} &= b_G \text{ jos } b_G \leq 15 \text{ mm} \\ b_{Ge} &= 3.8 * \sqrt{b_G} \text{ jos } b_G > 15 \text{ mm} \end{aligned} \right\} = 18,6 \text{ mm}$$

Tiivisteiden tehollinen halkaisija

$$d_{Ge} = d_{Go} - b_{Ge} = 249,4 \text{ mm} \quad (7)$$

Asennustilanteessa tarvittava tiivistevoima

$$F_{G0} = 0.5 * \pi * d_{Ge} * b_{Ge} * q_{min} = 182312,9 \text{ N} \quad (8)$$

Koeponnistustilanteessa tarvittava tiivistevoima

$$F_{G1} = \pi * d_{Ge} * b_{Ge} * m * p^K = 73509 \text{ N} \quad (9)$$

Suunnittelutilanteessa tarvittava tiivistevoima

$$F_{G2} = \pi * d_{Ge} * b_{Ge} * m * p^S = 46672 \text{ N} \quad (9)$$

$F_{G2} = 0$ on sallittu, jos paine on alipainetta

Liitoksen joustavuuskertoimet (liite I)

Tiivisteiden joustavuus

$$y_G = \frac{e_G * P_{QR}}{E_G * \pi * d_{Ge} * b_G}$$

$$y_G^A = 8,74E-08 \text{ mm/N} \quad (1.1)$$

$$y_G^S = 4,97E-08 \text{ mm/N}$$

Ruuvin joustavuus

$$y_B = \frac{L_B}{E_B^A * A_{Bmin} * n} = 1,46E-07 \text{ mm/N} \quad (1.2)$$



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LÄHTÖTIEDOT

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Kauluslaipat ja levylaipat

	Laippa	Vastalaippa	
Pituusparametri			
$l_0 = \sqrt{d_H * S_0}$	= 36,07 mm	36,07 mm	(I.3)
$K = \frac{D_F}{d_H}$	= 1,646	1,646	(I.4)
$\beta_T = \frac{K^2 * (1 + 8.55 * \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 * K^2) * (K - 1)}$	= 1,647	1,647	(I.5)
$\beta_U = \frac{K^2 * (1 + 8.55 * \lg K) - 1}{1.36 * (K^2 - 1) * (K - 1)}$	= 4,474	4,474	(I.6)
$\beta_V = \frac{1}{K - 1} * (0.69 + 5.72 * \frac{K^2 * \lg K}{K^2 - 1})$	= 4,103	4,103	(I.7)
$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1}$	= 2,169	2,169	(I.8)
β_F	= 0,797	0,797	(Kuva. I.2)
β_V	= 0,182	0,182	
f	= 1,135	1,135	
$\beta = \frac{S_1}{S_0}$	= 2,18	2,18	(I.9)
$x = \frac{l}{\sqrt{d_H * S_0}}$	= 0,610	0,610	(I.10)
Vakio λ			
$\lambda = \frac{\beta_F * h + l_0}{\beta_T * l_0} + \frac{\beta_V * h^3}{\beta_U * l_0 * S_0^2}$	= 1,32	1,32	(I.11)
Laipan kiertojoustavuus, asennustilanne			
$y_F = \frac{0.91 * \beta_V}{E^{20} * \lambda * S_0^2 * l_0}$	= 4,14E-10 1/Nmm	4,14E-10 1/Nmm	(I.12)
Laipan kiertojoustavuus, ulkoinen momentti			
$y_{F,M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 * \frac{D_{jako}}{E_{20} * D_F * h^3}$	= 1,44E-10 1/Nmm	1,44E-10 1/Nmm	(I.15)



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä
Puhelin

P.Vuorela

Laite/Piirustus

Sisältö

LÄHTÖTIEDOT

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Irtolaipat

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Pituusparametri

Laippa

Vastalaippa

$$l_0 = \sqrt{d_H * S_0} \quad = \quad \quad \quad (1.3)$$

Vakioita

$$\beta_F = 0.91 ; \beta_V = 0.55 ; f = 1$$

$$K = \frac{D_H}{d_H} \quad = \quad \quad \quad (1.4)$$

$$\beta_T = \frac{K^2 * (1 + 8.55 * \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 * K^2) * (K - 1)} \quad = \quad \quad \quad (1.5)$$

$$\beta_U = \frac{K^2 * (1 + 8.55 * \lg K) - 1}{1.36 * (K^2 - 1) * (K - 1)} \quad = \quad \quad \quad (1.6)$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K-1} * (0.69 + 5.72 * \frac{K^2 * \lg K}{K^2 - 1}) \quad = \quad \quad \quad (1.7)$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \quad = \quad \quad \quad (1.8)$$

$$\beta = \frac{S_1}{S_0} \quad = \quad \quad \quad (1.9)$$

$$x = \frac{l}{\sqrt{d_H * S_0}} \quad = \quad \quad \quad (1.10)$$

$$\lambda = \frac{\beta_F * h + l_0}{\beta_T * l_0} + \frac{\beta_V * h^3}{\beta_U * l_0 * S_0^2} \quad = \quad \quad \quad (1.11)$$

Kauluksen kiertojoustavuus, asennustilanne

$$y_F = \frac{0.91 * \beta_V}{E^{20} * \lambda * S_0^2 * l_0} \quad = \quad \quad \quad (1.12)$$

Kerroin

$$\psi_L = 1.28 * \lg \frac{D_L}{d_L} \quad = \quad \quad \quad (1.14)$$

Irtolaipan kiertojoustavuus, asennustilanne

$$y_L = \frac{1}{E_K^{20} * h_L^3 * \psi_L} \quad = \quad \quad \quad (1.13)$$

Kauluksen kiertojoustavuus, ulkoinen momentti

$$y_{F,M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 * \frac{D_S}{E_{20} * d_o * h^3} \quad = \quad \quad \quad (1.16)$$

Irtolaipan kiertojoustavuus, ulkoinen momentti

$$y_{L,M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 * \frac{D_{jako}}{E_{20} * d_{oL} * h_L^3} \quad = \quad \quad \quad (1.17)$$



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Umpilaipat

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Umpilaipan kiertojoustavuus, asennustilanne

$$K_C = \frac{D_X}{d_{Ge}} =$$

$$X_C = \frac{0.67 * [K_C^2 * (1 + 8.55 * \lg K_C) - 1]}{(K_C - 1) * [K_C^2 - 1 + (1.857 * (K_C^2 + 1) * \frac{h_C^3}{\delta_C^3})]} =$$

$$Y_C = \frac{X_C}{E_{F2}^A * \delta_C^3} = \quad (I.21)$$

Liitoksen jäykkyys (liite E)

Kauluslaipat ja levylaipat

Liitoksen jäykkyys

$$\gamma = \frac{1}{y_G^S + y_B * \frac{E_B^A}{E_B^S} + \left(y_{F1} * \frac{E_{F1}^A}{E_{F1}^S} + y_{F2} * \frac{E_{F2}^A}{E_{F2}^S} \right) * b^2} = 1505627 \text{ N/mm} \quad (E.8)$$

ruuvien momenttivarsi

$$b = 0.5 * (D_{jako} - d_{Ge}) = 22,81 \text{ mm} \quad (E.1)$$

Irtolaipat

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Liitoksen jäykkyys

$$\gamma = \frac{1}{y_G^S + y_B * \frac{E_B^A}{E_B^S} + \left(y_{L1} * \frac{E_{L1}^A}{E_{L1}^S} + y_{L2} * \frac{E_{L2}^A}{E_{L2}^S} \right) * a^2 + \left(y_{F1} * \frac{E_{F1}^A}{E_{F1}^S} + y_{F2} * \frac{E_{F2}^A}{E_{F2}^S} \right) * b^2} = \text{N/mm} \quad (E.9)$$

Ruuvien momenttivarret

$$a = 0.5 * (D_{jako} - D_S) = \text{mm} \quad (E.2)$$

$$b = 0.5 * (D_S - d_{Ge}) = \text{mm} \quad (E.3)$$

Umpilaippa

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Liitoksen jäykkyys

$$\gamma = \frac{1}{y_G^S + y_B * \frac{E_B^A}{E_B^S} + \left(y_{F1} * \frac{E_{F1}^A}{E_{F1}^S} + y_C * \frac{E_{F2}^A}{E_{F2}^S} \right) * b^2} = \text{N/mm} \quad (E.10)$$



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Kauluslaipat, levylaipat ja irtolaipat

Jäykkyyskerroin, sisäinen paine/ulkoinen aksiaalivoima

$$\alpha = 1 - \frac{y_G - (y_{F1} * e_1 + y_{F2} * e_2) * b}{y_G^A + y_B + (y_{F1} + y_{F2}) * b^2} = 1,34 \quad (E.11)$$

Umpilaippa

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\alpha = 1 - \frac{y_G - (y_F * e + y_C * b) * b}{y_G^A + y_B + (y_F + y_C) * b^2} = \quad (E.12)$$

Kauluslaipat ja levylaipat

Laippa

Vastalaippa

Kauluksen kartiokkaan osan mitoista riippuva kerroin

$$\zeta = 1 + (\beta - 1) * \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} \quad 1,51 \quad 1,51 \quad (E.6)$$

Kaikki laippatyypit

Kaulusosan ekvivalentti paksuus

$$S_E = \zeta * S_0 \quad 9,53 \text{ mm} \quad 9,53 \text{ mm} \quad (E.5)$$

Paineesta johtuva momenttivarssi

$$e = 0.5 * (d_{Ge} - d_F - S_e) \quad 16,68 \text{ mm} \quad 16,68 \text{ mm} \quad (E.4)$$

Kauluslaipat ja levylaipat

Jäykkyyskerroin, ulkoinen momentti

$$\alpha_M = \frac{y_B + 2 * y_{FM} * b * (b + e - \frac{e^2}{d_{Ge}})}{y_B + y_G^A * \left(\frac{D_{jako}}{d_{Ge}}\right)^2 + 2 * y_{FM} * b^2} = 0,95 \quad (E.13)$$

Irtolaipat

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\alpha_M = \frac{y_B + 2 * y_{LM} * a^2 + 2 * y_{FM} * b * (b + e - \frac{e^2}{d_{Ge}})}{y_B + y_G^A * \left(\frac{D_{jako}}{d_{Ge}}\right)^2 + 2 * y_{LM} * a^2 + 2 * y_{FM} * b^2} = \quad (E.14)$$



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Lämpölaajenemisesta johtuvat kuormat

Kauluslaippa - Kauluslaippa tai Levylaippa - Levylaippa

$$F_T = \gamma * [\alpha_{F1} * h_1 * (t_{F1} - t_A) + \alpha_{F2} * h_2 * (t_{F2} - t_A) - \alpha_B * (h_1 + h_2) * (t_B - t_A)] \quad (13)$$

$$= 0 \quad \text{N}$$

Irtolaippa/kaulusrakenne-Irtolaippa/kaulusrakenne

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$F_T = \gamma * \left[\alpha_{F1} * h_1 * (t_{F1} - t_A) + \alpha_{F2} * h_2 * (t_{F2} - t_A) + \alpha_{L1} * h_{L1} * (t_{L1} - t_A) + \alpha_{L2} * h_{L2} * (t_{L2} - t_A) - \alpha_B * (h_1 + h_2 + h_{L1} + h_{L2}) * (t_B - t_A) \right]$$

$$= \quad \text{N} \quad (14)$$

Kauluslaippa tai irtolaippa ja kaulus - umpilaippa

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$F_T = \gamma * [\alpha_F * h * (t_F - t_A) + \alpha_C * h_C * (t_C - t_A) - \alpha_B * (h_1 + h_C) * (t_B - t_A)] \quad (15)$$

$$= \quad \text{N}$$

Varuste laippojen välissä

$$F_T = \gamma * [\alpha_{F1} * h_1 * (t_{F1} - t_A) + \alpha_{F2} * h_2 * (t_{F2} - t_A) + \alpha_p h_p * (t_p - t_A) - \alpha_B * (h_1 + h_2 + h_p) * (t_B - t_A)] \quad (16)$$

$$= 0$$

RUUVIVOIMIEN LASKENTA

Ruuveissa vaikuttavat voimat (kohdat 6.1 - 6.5)

Ruuvien kokonaispoikkipinta-ala

$$A_{B,TOT} = n * A_{Bmin} = 1801,518 \text{ mm}^2 \quad (10)$$

Liitoksessa vaikuttavat kuormitukset eri tilanteissa:

$$F_P = 0.785 * d_{Ge}^2 * p \quad F_{FM} = F \pm \frac{4 * |M|}{d_{Ge}} \quad (11), (12)$$

Indeksit myöhemmissä vaiheissa:
koeponnistustilanne = 1
suunnittelutilanne = 2

	Koeponnistus	Suunnittelu
F_P [N]	61514,42	39056,78
$F_{FM(+)}$ [N]	0	77197,65
$F_{FM(-)}$ [N]	0	-83197,65



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Asennustilanteen ruuvivoima

Tarvittava esikivistysvoima koeponnistustilanne ja suunnittelutilanne huomioon ottaen

$$F_{B1} = \max \left[\begin{array}{l} \alpha * (F_P^K + F_A^K) + F_G^A + \frac{4 * \alpha_M * |M_A^K|}{d_{Ge}} \\ \alpha * (F_P^S + F_A^S) + F_G^S + \frac{4 * \alpha_M * |M_A^S|}{d_{Ge}} - F_T \end{array} \right], \quad \begin{array}{ll} F_{B1}^K = & 156097 \text{ N} \\ F_{B1}^S = & 171361 \text{ N} \end{array}$$

Tarvittava (laskettu) esikivistysvoima riittävän puristuspuheen aikaansaamiseksi

$$F_{B2} = \max\{F_{G0}; 0.4 * A_{B,TOT} * \sigma_y^B\} = 182313 \text{ N}$$

Asennustilanteen ruuvivoima on suurempi kahdesta seuraavasta arvosta:

$$F_B^A = \max\{F_{B1}; F_{B2}\} = 182313 \text{ N} \quad (17)$$

Koeponnistustilanteen ruuvivoima:

$$F_B^K = F_B^A + (1 - \alpha) * (F_{P1} + F_A^K) + \frac{4 * (1 - \alpha_M) * |M_A^K|}{d_{Ge}} = 161242 \text{ N} \quad (18)$$

Suunnittelutilanteen ruuvivoima:

$$F_B^S = F_B^A + (1 - \alpha) * (F_{P2} + F_A^S) + F_T + \frac{4 * (1 - \alpha_M) * |M_A^S|}{d_{Ge}} = 173878 \text{ N} \quad (18)$$

KIRISTYSMOMENTTI

Tätä määrittelyä ei ole standardissa GOST R 52857.4:2007 mukainen, vaan noudattelee standardin SFS-EN 1591-1:2014 käyttämää tapaa.

Ruuvien 'momenttivarsi' kiristykselle:

$$k_B = \frac{p_t}{2 * \pi} + \frac{\mu_t * d_{B2}}{2 * \cos \alpha} + 0,5 * \mu_n * d_n = 4,4 \text{ mm}$$

$$M_T = \frac{k_B * F_B^A}{n} = 101 \text{ Nm}$$



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Ruuvin ja tiivisteen jännitystarkastelu

Tarkasteluissa käytettävät kertoimet

$$\xi = 1,2$$

$$K_{cond} = 1 \text{ käyttötilanteessa}$$

$$= 1,35 \text{ koeponnistustilanteessa}$$

$$K_{cont} = 1 \text{ jos kontrolloimaton kiristys}$$

$$= 1,1 \text{ jos kiristysmomenttia kontrolloidaan}$$

$$= 1,3 \text{ jos ruuvin venymää kontrolloidaan}$$

$$K_T = 1,3 \text{ (lämpölaajenemisesta aiheutuvat kuormat huomioidaan, ohjelman oletus)}$$

Ruuvin vaikuttava jännitys asennustilanteessa

$$\sigma_B^A = \frac{F_B^A}{A_B} = 101 \text{ MPa} \quad (19)$$

$$\sigma_{B,sall}^A = \xi * K_{cond} * K_{cont} * K_T * \sigma_{B,nim}^A = 269 \text{ MPa} \quad (D.3)$$

$$\sigma_B^A \leq \sigma_{B,sall}^A \quad 0,38 \quad \text{OK} \quad (21)$$

Ruuvin vaikuttava jännitys koeponnistustilanteessa

$$\sigma_B^K = \frac{F_B^K}{A_B} = 90 \text{ MPa} \quad (20)$$

$$\sigma_{B,sall}^K = K_{cond} * K_{cont} * K_T * \sigma_{B,nim}^K = 303 \text{ MPa} \quad (D.4)$$

$$\sigma_B^K \leq \sigma_{B,sall}^K \quad 0,30 \quad \text{OK} \quad (22)$$

Ruuvin vaikuttava jännitys suunnittelutilanteessa

$$\sigma_B^S = \frac{F_B^S}{A_B} = 97 \text{ MPa} \quad (20)$$

$$\sigma_{B,sall}^S = K_{cond} * K_{cont} * K_T * \sigma_{B,nim}^S = 210 \text{ MPa} \quad (D.4)$$

$$\sigma_B^S \leq \sigma_{B,sall}^S \quad 0,46 \quad \text{OK} \quad (22)$$

Tiivisteen kestävyys

Tiivisteessä vaikuttava jännitys

$$q = \frac{\max\{F_B^A, F_B^K, F_B^S\}}{\pi * d_{Ge} * b_{Ge}} = 25,0 \text{ MPa} \quad (23)$$

$$q \leq q_{max} \quad 0,13 \quad \text{OK}$$



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Laippaliitoksen lujuustarkastelu (kohta 8)

Laippaan vaikuttava laskettu momentti

ASENNUSTILANNE

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi * D_{jako}}{n}}{2 * d_{B0} + \frac{6 * h}{m + 0,5}}} \right\} \quad (I.18)$$

Kauluslaippa ja levylaippa

Laippa

Vastalaippa

$$M^A = C_F * F_B^A * b$$

$$\begin{aligned} M^A &= 5274 \text{ Nm} \\ C_F &= 1,27 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &5274 \text{ Nm} \\ &1,27 \end{aligned} \quad (24)$$

Irtolaippa/kaulusrakenne

Olake

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$M^A = C_F * F_B^A * b$$

$$\begin{aligned} M^A &= \text{Nm} \\ C_F &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Nm} \\ & \end{aligned} \quad (24)$$

Irtolaippa

$$M_L^A = C_F * F_B^A * a$$

$$\begin{aligned} M_L^A &= \text{Nm} \\ C_F &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Nm} \\ & \end{aligned} \quad (25)$$

Laipassa vaikuttavat lasketut jännitykset

ASENNUSTILANNE

Kaulusosan jännitykset

d^* on normalisoitu halkaisija, joka määräytyy laipan mittasuhteiden perusteella (I.19)

Kauluslaipan kauluksen paksu osa

Laippa

Vastalaippa

$$\sigma_1^A = \frac{M^A}{\lambda * (S_1 - c)^2 * d^*}$$

$$= 115,2 \text{ MPa}$$

$$115,2 \text{ MPa} \quad (28)$$

$$d^* = 212,8 \text{ mm}$$

$$212,80 \text{ mm} \quad (I.19)$$

Kauluslaipan kauluksen ohut osa

$$\sigma_0^A = f * \sigma_1^A$$

$$= 130,8 \text{ MPa}$$

$$130,8 \text{ MPa} \quad (29)$$

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Irtolaipparakenteen kaulus

$$\sigma_0^A = \sigma_1^A = \frac{M^A}{\lambda * (S_0 - c)^2 * d^*}$$

$$= \text{MPa}$$

$$\text{MPa} \quad (30)$$

$$d^* = \text{mm}$$

$$\text{mm}$$

Levylaippa

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\sigma_0^A = \sigma_1^A = \frac{M^A}{\lambda * (e_s - c)^2 * d^*}$$

$$= \text{MPa}$$

$$\text{MPa} \quad (30)$$

$$d^* = \text{mm}$$

$$\text{mm}$$



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Laippaosan jännitykset

Kauluslaippa, levylaippa, irtolaipparakenteen kaulus

Radiaalijännitys

Laippa

Vastalaippa

$$\sigma_R^A = \frac{(1.33 * \beta_F * h + l_0)}{\lambda * h^2 * l_0 * d} * M^A = 57,2 \text{ MPa} \quad 57,2 \text{ MPa} \quad (31)$$

Tangentiaalijännitys

$$\sigma_T^A = \frac{\beta_y * M^A}{h^2 * d} - \beta_z * \sigma_R^A = 58,0 \text{ MPa} \quad 58,0 \text{ MPa} \quad (32)$$

Irtolaippa

Tangentiaalijännitys

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\sigma_{T,L}^A = \frac{\beta_y * M_L^A}{h_L^2 * d_L} = \text{MPa} \quad \text{MPa} \quad (33)$$

Laipan jännitystarkastelu

Kaulusosassa vaikuttavat jännitykset

ASENNUSTILANNE

Kauluslaipan kauluksen paksu osa

$$\max\{|\sigma_1^A + \sigma_R^A|; |\sigma_1^A + \sigma_T^A|\} \leq K_T * 1.5 * \sigma_{F0} \quad (43)$$

Laippa

Vastalaippa

Laskettu jännitys [MPa]	173,2	173,2
Sallittu jännitys [MPa]	312	312
Jännitysten suhde	0,56	OK

Kauluslaipan kauluksen ohut osa

$$\sigma_0^A \leq K_T * 3 * \sigma_{F0} \quad (45)$$

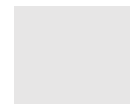
Laskettu jännitys [MPa]	130,8	130,8
Sallittu jännitys [MPa]	624	624
Jännitysten suhde	0,21	OK

Irtolaipparakenteen kaulus

$$\max\{|\sigma_0^A + \sigma_R^A|; |\sigma_0^A + \sigma_T^A|\} \leq K_T * 1.5 * \sigma_{F0} \quad (47)$$

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Laskettu jännitys [MPa]
Sallittu jännitys [MPa]
Jännitysten suhde





PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Levyalaippa (liittyvä putki)

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\max\{|\sigma_0^A + \sigma_R^A|; |\sigma_0^A + \sigma_T^A|\} \leq K_T * 1.5 * \sigma_{S0}$$

Laippa

Vastalaippa

(47)

Laskettu jännitys [MPa]

Sallittu jännitys [MPa]

Jännitysten suhde

Jos levyalaipan sisähalkaisija > 400 mm, voidaan käyttää seuraavaa sallittua jännitystä:

$$\max\{|\sigma_0^A + \sigma_R^A|; |\sigma_0^A + \sigma_T^A|\} \leq K_T * 3 * \sigma_{F0}$$

Sallittu jännitys [MPa]

Jännitysten suhde

Laippaosassa vaikuttavat jännitykset

ASENNUSTILANNE

Kauluslaippojen laippaosa, levyalaipat ja irtolaippojen kaulus

(54)

$$\max\{|\sigma_R^A|; |\sigma_T^A|\} \leq 1.3 * \sigma_F$$

Laskettu jännitys [MPa]

58,0

58,0

Sallittu jännitys [MPa]

208

208

Jännitysten suhde

0,28

OK

0,28

OK

Irtolaipan laippaosa

$$\sigma_{T,L}^A \leq 1.3 * \sigma_L^A$$

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Laskettu jännitys [MPa]

Sallittu jännitys [MPa]

Jännitysten suhde

(56)

Laippaliitoksen lujuustarkastelu (kohta 8)

Laippaan vaikuttava laskettu momentti

KOEPPONNISTUSTILANNE

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi * D_{jako}}{n}}{2 * d_{B0} + \frac{6 * h}{m + 0,5}}} \right\} \quad (I.18)$$

Kauluslaippa ja levyalaippa

$$M^K = C_F * \max\{[F_B^K * b + (F_{P1} + F_{FM1}) * e]; |F_{P1} + F_{FM1}| * e\}$$

M^K = 5966 NmC_F = 1,27

5966 Nm

1,27

(26)



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Irtolaippa/kaulusrakenne

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Olake

Laippa

Vastalaippa

$$M^K = C_F * \max\{[F_B^K * b + (F_{P1} + F_{FM1}) * e]; |F_{P1} + F_{FM1}| * e\}$$

$$M^K = \quad \text{Nm} \quad (26)$$

$$C_F =$$

Irtolaippa

$$M_L^K = C_F * F_B^K * a$$

$$M_L^K = \quad \text{Nm} \quad (27)$$

$$C_F = \quad (1.18)$$

Laipassa vaikuttavat lasketut jännitykset

KOEPONNISTUSTILANNE

Kaulusosan jännitykset

Kaulusosassa vaikuttava meridiaanitaivutusjännitys

d^* on normalisoitu halkaisija, joka riippuu laipan mittasuhteista (1.19)

Kauluslaipan kauluksen paksu osa

$$\sigma_1^K = \frac{M^K}{\lambda * (S_1 - c)^2 * d^*} = 130,3 \text{ MPa} \quad 130,3 \text{ MPa} \quad (34)$$

Kauluslaipan kauluksen ohut osa

$$\sigma_0^K = f * \sigma_1^K = 148,0 \text{ MPa} \quad 148,0 \text{ MPa} \quad (35)$$

Irtolaipparakenteen kaulus

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\sigma_0^K = \sigma_1^K = \frac{M^K}{\lambda * (S_0 - c)^2 * d^*} = \text{MPa} \quad \text{MPa} \quad (36)$$

Levyalaippa (liittyvä putki)

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\sigma_0^K = \sigma_1^K = \frac{M^K}{\lambda * (e_s - c)^2 * d^*} = \text{MPa} \quad \text{MPa} \quad (36)$$

Kaulusosan pitkittäinen kalvojännitys

Kauluslaipan kauluksen paksu osa

$$\sigma_{1M,M}^K = \frac{F_{P1} + F \pm \frac{4 * |M|}{d_{Ge}}}{\pi * (d_H + S_1) * (S_1 - c)} = 7,0 \text{ MPa} \quad 7,0 \text{ MPa} \quad (37)$$

Kauluslaipan kauluksen ohut osa, irtolaipan kaulus

$$\sigma_{0M,M}^K = \frac{F_{P1} + F \pm \frac{4 * |M|}{d_{Ge}}}{\pi * (d_H + S_0) * (S_0 - c)} = 17,4 \text{ MPa} \quad 17,4 \text{ MPa} \quad (38)$$

Levyalaippa (liittyvä putki)

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\sigma_{0M,M}^K = \frac{F_{P1} + F \pm \frac{4 * |M|}{d_{Ge}}}{\pi * (d_H + e_s) * (e_s - c)} = \text{MPa} \quad \text{MPa} \quad (38)$$



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Tangentiaalinen (kehä) kalvojäännitys kaulusosassa

Kauluksen ohut pää ja irtolaipparakenteen kaulus

$$\sigma_{0M,O}^K = \frac{p_1 * d_H}{2 * (S_0 - c)} = 24,5 \text{ MPa}$$

(39)

Levy-laippa (liittyvä putki)

$$\sigma_{0M,O}^K = \frac{p_1 * d_H}{2 * (e_s - c)} = \text{MPa}$$

(39)

Laippaosan jännitykset

Kauluslaippa, levy-laippa, irtolaipan kaulus

Radiaalijännitys

$$\sigma_R^K = \frac{(1.33 * \beta_F * h + l_0)}{\lambda * h^2 * l_0 * d_H} * M^K = 64,6 \text{ MPa}$$

(40)

Tangentiaalijännitys

$$\sigma_T^K = \frac{\beta_y * M^K}{h^2 * d_H} - \beta_z * \sigma_R^K = 65,6 \text{ MPa}$$

(41)

Tangentiaalijännitys irtolaippassa

$$\sigma_{T,L}^K = \frac{\beta_y * M_L^K}{h_L^2 * d_L} = \text{MPa}$$

(42)

Laipan jännitystarkastelu

KOEPONNISTUSTILANNE

Kauluslaipan kaulusosan paksu pää

$$\max\{|\sigma_1^K - \sigma_{1M,M}^K + \sigma_R^K|; |\sigma_1^K - \sigma_{1M,M}^K + \sigma_T^K|; |\sigma_1^K + \sigma_{1M,M}^K|\} \leq K_T * 1.5 * \sigma_{F1}$$

Laskettu jännitys [MPa]	189,0	189,0	(44)
Sallittu jännitys [MPa]	444,6	444,6	
Jännitysten suhde	0,43	OK	OK

Kauluslaipan kaulusosan ohut pää

$$\max\{|\sigma_0^K \pm \sigma_{0M,M}^K|; |0.3 * \sigma_0^K \pm \sigma_{0M,0}^K|; |0.7 * \sigma_0^K \pm (\sigma_{0M,M}^K - \sigma_{0M,0}^K)|\} \leq 1.3 * 3 * \sigma_{F1}$$

Laskettu jännitys [MPa]	165,3	165,3	(46)
Sallittu jännitys [MPa]	889,2	889,2	
Jännitysten suhde	0,19	OK	OK

Irtolaipparakenteen kaulus

$$\max\{|\sigma_0^K - \sigma_{0M,M}^K + \sigma_R^K|; |\sigma_0^K - \sigma_{0M,M}^K + \sigma_T^K|; |\sigma_0^K + \sigma_{0M,M}^K|\} \leq K_T * 1.5 * \sigma_{F1}$$

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Laskettu jännitys [MPa]			(48)
Sallittu jännitys [MPa]			
Jännitysten suhde			



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Levyalaippa (liittyvä putki)

$$\max\{|\sigma_0^K - \sigma_{0M,M}^K + \sigma_R^K|; |\sigma_0^K - \sigma_{0M,M}^K + \sigma_T^K|; |\sigma_0^K + \sigma_{0M,M}^K|\} \leq K_T * 1.5 * \sigma_{S1}$$

Laippa

Vastalaippa

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Laskettu jännitys [MPa]

Sallittu jännitys [MPa]

Jännitysten suhde

(48)

Jos levyalaipan sisähalkaisija > 400 mm
voidaan käyttää seuraavaa sallittua jännitystä:

Sallittu jännitys [MPa]

Jännitysten suhde

Kauluslaippojen laippaosa, levyalaipat ja irtolaippojen kaulus

(55)

$$\max\{|\sigma_R^K|; |\sigma_T^K|\} \leq 1.3 * \sigma_F$$

Laskettu jännitys [MPa]

65,6

Sallittu jännitys [MPa]

296,4

Jännitysten suhde

0,22

OK

65,6

296,4

0,22

OK

Irtolaipan laippaosalle

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\sigma_{T,L}^K \leq 1.3 * \sigma_L^K$$

Laskettu jännitys [MPa]

Sallittu jännitys [MPa]

Jännitysten suhde

(57)

Kaikissa olosuhteissa on täyttyävä:

Kauluslaippa, irtolaipparakenteen kaulus

$$\max\{|\sigma_{0M,0}^K|; |\sigma_{0M,M}^K|\} \leq \sigma_F$$

(53)

Laskettu jännitys [MPa]

24,5

Sallittu jännitys [MPa]

228

Jännitysten suhde

0,11

OK

24,55

228

0,11

OK

Levyalaippa (liittyvä putki)

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\max\{|\sigma_{0M,0}^K|; |\sigma_{0M,M}^K|\} \leq \sigma_S$$

(53)

Laskettu jännitys [MPa]

Sallittu jännitys [MPa]

Jännitysten suhde



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Laippaliitoksen lujuustarkastelu (kohta 8)

Laippaan vaikuttava laskettu momentti

SUUNNITTELUTILANNE

$$C_F = \max \left\{ 1; \frac{\frac{\pi * D_{jako}}{n}}{\sqrt{2 * d_{B0} + \frac{6 * h}{m + 0,5}}} \right\} \quad (I.18)$$

Laippa

Vastalaippa

Kauluslaippa, levylaippa

$$M^S = C_F * \max \{ [F_B^S * b + (F_{P2} + F_{FM2}) * e]; |F_{P2} + F_{FM2}| * e \}$$

$$\begin{aligned} M^S &= 7489 \text{ Nm} \\ C_F &= 1,27 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M^S &= 7489 \text{ Nm} \\ C_F &= 1,27 \end{aligned}$$

(26)

Irtolaippa/kaulusrakenne

Olake

$$M^S = C_F * \max \{ [F_B^S * b + (F_{P2} + F_{FM2}) * e]; |F_{P2} + F_{FM2}| * e \}$$

$$\begin{aligned} M^S &= \\ C_F &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M^S &= \\ C_F &= \end{aligned}$$

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

(27)

Irtolaippa

$$M_L^S = C_F * F_B^S * a$$

$$\begin{aligned} M_L^S &= \\ C_F &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_L^S &= \\ C_F &= \end{aligned}$$

(I.18)

Laipassa vaikuttavat lasketut jännitykset, suunnittelutilanne

d* on normalisoitu halkaisija, joka määräytyy laipan mittasuhteiden perusteella (I.19)

Kaulusosassa vaikuttava meridiaanitaivutusjännitys

Kauluslaipan kauluksen paksu osa

$$\sigma_1^S = \frac{M^S}{\lambda * (S_1 - c)^2 * d^*} \quad 163,6 \text{ MPa} \quad 163,6 \text{ MPa} \quad (34)$$

Kauluslaipan kauluksen ohut osa

$$\sigma_0^S = f * \sigma_1^S \quad 185,8 \text{ MPa} \quad 185,8 \text{ MPa} \quad (35)$$

Irtolaipparakenteen kaulus

$$\sigma_0^S = \sigma_1^S = \frac{M^S}{\lambda * (S_0 - c)^2 * d^*} \quad \text{MPa} \quad \text{MPa} \quad (36)$$

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Levylaipat

$$\sigma_0^S = \sigma_1^S = \frac{M^S}{\lambda * (e_s - c)^2 * d^*} \quad \text{MPa} \quad \text{MPa} \quad (36)$$



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Kaulusosan pitkittäinen kalvojännitys

Laippa

Vastalaippa

Kauluslaipan kauluksen paksu osa

$$\sigma_{1M,M}^S = \frac{F_{P2} + F \pm \frac{4 * |M|}{d_{Ge}}}{\pi * (d + S_1) * (S_1 - c)} \quad 13,2 \quad \text{MPa} \quad 13,2 \quad \text{MPa} \quad (37)$$

Kauluslaipan kauluksen ohut osa, irtolaipparakenteen kaulus

$$\sigma_{0M,M}^S = \frac{F_{P2} + F \pm \frac{4 * |M|}{d_{Ge}}}{\pi * (d + S_0) * (S_0 - c)} \quad 32,8 \quad \text{MPa} \quad 32,8 \quad \text{MPa} \quad (38)$$

Levyalaippa (liittyvä putki)

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\sigma_{0M,M}^S = \frac{F_{P2} + F \pm \frac{4 * |M|}{d_{Ge}}}{\pi * (d + e_s) * (e_s - c)} \quad \text{MPa} \quad \text{MPa} \quad (38)$$

Tangentiaalinen (kehä) kalvojännitys kaulusosassa

Kauluksen ohut pää ja irtolaipparakenteen kaulus

$$\sigma_{0M,0}^S = \frac{p * d_H}{2 * (S_0 - c)} = 15,6 \quad \text{MPa} \quad 15,6 \quad \text{MPa} \quad (39)$$

Levyalaippa (liittyvä putki)

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\sigma_{0M,0}^S = \frac{p * d_H}{2 * (e_s - c)} = \text{MPa} \quad \text{MPa} \quad (39)$$

Laippaosan jännitykset

Kauluslaippa, levyalaippa ja irtolaipparakenteen kaulus

Radiaalijännitys

$$\sigma_R^S = \frac{(1.33 * \beta_F * h + l_0)}{\lambda * h^2 * l_0 * d_H} * M^S = 81,2 \quad \text{MPa} \quad 81,2 \quad \text{MPa} \quad (40)$$

Tangentiaalijännitys

$$\sigma_T^S = \frac{\beta_y * M^S}{h^2 * d_H} - \beta_z * \sigma_R^S = 82,3 \quad \text{MPa} \quad 82,3 \quad \text{MPa} \quad (41)$$

Tangentiaalijännitys irtolaippassa

Kaava ei koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\sigma_{T,L}^S = \frac{\beta_y * M_L^S}{h_L^2 * d_L} = \text{MPa} \quad \text{MPa} \quad (42)$$



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Laipan jännitystarkastelu

SUUNNITTELUTILANNE

$$Kauluslaipan kaulusosan paksu pää \quad \max\{|\sigma_1^S - \sigma_{1M,M}^S + \sigma_R^S|; |\sigma_1^S - \sigma_{1M,M}^S + \sigma_T^S|; |\sigma_1^S + \sigma_{1M,M}^S|\} \leq K_T * 1.5 * \sigma_{F2}$$

	Laippa		Vastalaippa	
Laskettu jännitys [MPa]	232,8		232,8	(44)
Sallittu jännitys [MPa]	226,2		226,2	
Jännitysten suhde	1,03	EI OK	1,03	EI OK

Kauluslaipan kaulusosan ohut pää

$$\max\{|\sigma_0^S \pm \sigma_{0M,M}^S|; |0.3 * \sigma_0^S \pm \sigma_{0M,O}^S|; |0.7 * \sigma_0^S \pm (\sigma_{0M,M}^S - \sigma_{0M,O}^S)|\} \leq K_T * 3 * \sigma_{F2}$$

Laskettu jännitys [MPa]	218,6		218,6	(46)
Sallittu jännitys [MPa]	452,4		452,4	
Jännitysten suhde	0,48	OK	0,48	OK

Irtolaipparakenteen kaulus 8.5.3

$$\max\{|\sigma_0^S - \sigma_{0M,M}^S + \sigma_R^S|; |\sigma_0^S - \sigma_{0M,M}^S + \sigma_T^S|; |\sigma_0^S + \sigma_{0M,M}^S|\} \leq K_T * 1.5 * \sigma_{F2}$$

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Laskettu jännitys [MPa]				(48)
Sallittu jännitys [MPa]				
Jännitysten suhde				

Levylaippa

$$\max\{|\sigma_0^S - \sigma_{0M,M}^S + \sigma_R^S|; |\sigma_0^S - \sigma_{0M,M}^S + \sigma_T^S|; |\sigma_0^S + \sigma_{0M,M}^S|\} \leq K_T * 1.5 * \sigma_{S2}$$

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Laskettu jännitys [MPa]				(48)
Sallittu jännitys [MPa]				
Jännitysten suhde				

Jos levylaipan sisähalkaisija > 400 mm
voidaan käyttää seuraavaa sallittua jännitystä:

Sallittu jännitys [MPa]
Jännitysten suhde

Kauluslaippojen laippaosa, levylaippa, irtolaipparakenteen kaulus

(55)

$$\max\{|\sigma_R^S|; |\sigma_T^S|\} \leq 1.3 * \sigma_F$$

Laskettu jännitys [MPa]	82,3		82,3	
Sallittu jännitys [MPa]	150,8		150,8	
Jännitysten suhde	0,55	OK	0,55	OK



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Irtolaipan laippaosa

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\sigma_{T,L}^S \leq 1.3 \cdot \sigma_L^S$$

Laippa

Vastalaippa

(57)

Laskettu jännitys [MPa]

Sallittu jännitys [MPa]

Jännitysten suhde

Kaikissa olosuhteissa on täyttyvä:

Kauluslaippa, irtolaipparakenteen kaulus

(53)

$$\max\{|\sigma_{0M,0}^S|; |\sigma_{0M,M}^S|\} \leq \sigma_F$$

Laskettu jännitys [MPa]

32,8

Sallittu jännitys [MPa]

116

Jännitysten suhde

0,28

OK

32,81

116

0,28

OK

Levyalaippa (liittyvä putki)

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\max\{|\sigma_{0M,0}^S|; |\sigma_{0M,M}^S|\} \leq \sigma_S$$

(53)

Laskettu jännitys [MPa]

Sallittu jännitys [MPa]

Jännitysten suhde

Laipan kiertymä (kohta 9)

Koeponnistustilanne, $K_\theta = 1,3$

Kauluslaipat

Laippa

Vastalaippa

$$\theta = M^K \cdot y_F \cdot \frac{E_F^{20}}{E_F} \leq K_\theta \cdot [\theta]$$

(58)

Laskettu kiertymä [°]

0,14

Sallittu kiertymä [°]

0,45

Kiertymän suhde

0,32

OK

0,14

0,45

0,32

OK

Levyalaipat

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

$$\theta = M^K \cdot y_F \cdot \frac{E_F^{20}}{E_F} \leq K_\theta \cdot [\theta]$$

Laskettu kiertymä [°]

Sallittu kiertymä [°]

Kiertymän suhde



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

LASKENTAKAAVAT JA TULOKSET

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

Irtolaipat
kaulusosa $\theta = M^K * y_F * \frac{E_F^{20}}{E_F} \leq K_\theta * [\theta]$

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Laippa

Vastalaippa

Laskettu kiertymä [°]
Sallittu kiertymä [°]
Kiertymän suhde

laippaosa $\theta = M_L^K * y_L * \frac{E_L^{20}}{E_L} \leq K_\theta * [\theta_L]$

Laskettu kiertymä [°]
Sallittu kiertymä [°]
Kiertymän suhde

Suunnittelutilanne, $K_\theta = 1$

(58)

Kauluslaipat $\theta = M^S * y_F * \frac{E_F^{20}}{E_F} \leq K_\theta * [\theta]$

Laskettu kiertymä [°] 0,19
Sallittu kiertymä [°] 0,34
Kiertymän suhde 0,55 OK

0,19
0,34
0,55 OK

Levyalaipat $\theta = M^S * y_F * \frac{E_F^{20}}{E_F} \leq K_\theta * [\theta]$

Laskettu kiertymä [°]
Sallittu kiertymä [°]
Kiertymän suhde

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

Irtolaipat $\theta = M^S * y_F * \frac{E_F^{20}}{E_F} \leq K_\theta * [\theta]$

Kaavat eivät koske tarkastelun alla olevaa liitosta

kaulusosa Laskettu kiertymä [°]
Sallittu kiertymä [°]
Kiertymän suhde

laippaosa $\theta = M_L^S * y_L * \frac{E_L^{20}}{E_L} \leq K_\theta * [\theta_L]$

Laskettu kiertymä [°]
Sallittu kiertymä [°]
Kiertymän suhde



PUTKISUUNNITTELU

GOST R 52857.4-2007

YLEISTIEDOT

Asiakas
Projekti
Työnumero

Päiväys
Tekijä **P.Vuorela**
Puhelin

Laite/Piirustus

Sisältö

YHTEENVETO

Liitos:	laippa	vastalaippa	DN	PN	paine (S) [Mpa]	lämpötila [°C]
	11	11	200	10	0,8	200

TULOSTEN YHTEENVETO

Laippa 1

Laippa / olake
Irtolaippa

P250GH (SFS-EN 10222-2:2017)

Laippa 2

Laippa /olake
Irtolaippa

P250GH (SFS-EN 10222-2:2017)

Muut osat

Ruuvi
Liittyvä vaippa/putki
Välivaruste
Tiiviste

25CrMo4 (SFS-EN 10269:2013)

hiilikuitu, Klingersil C 4500

Asennustilanne	Koeponnistustilanne	Suunnittelutilanne
----------------	---------------------	--------------------

Laippa

Kaulusosa
Laippaosa
Laippa / irtolaipan kaulus
Irtolaippa
Laipan kiertymä
Laippa / irtolaipan kaulus
Irtolaippa

0,56	0,43	1,03
0,28	0,22	0,55
	0,32	0,55

Vastalaippa

Kaulusosa
Laippaosa
Laippa / irtolaipan kaulus
Irtolaippa
Laipan kiertymä
Laippa / irtolaipan kaulus
Irtolaippa

0,56	0,43	1,03
0,28	0,22	0,55
	0,32	0,55

Ruuvi

0,38	0,30	0,46
------	------	------

Tiiviste

0,13

Kirstysmomentti

101	Nm
-----	----

Verifiointilaskelma laippalaskentaohjelmalle, joka perustuu standardiin GOST R 52857-4:2007

Laskennassa tarkastellaan PN 10 DN 200 kauluslaippaparia.
 Laipat ovat standardin SFS-EN 1092-1 tyyppin 11 kauluslaippoja.
 Liitoksessa käytettävä tiiviste on Klingersil C-4500 hiilikuitutiiviste.
 Liitoksen suunnitteluarvot ovat 200 °C ja 8 bar (g). Koeponnistuspaine on 12,6 bar.
 Laippojen materiaalina on P250 GH (SFS-EN 10222-2)
 Ruuvien materiaalina on 25CrMo4 (SFS-EN 10269)
 Liitokseen kohdistuva ulkoinen kuormitus:
 aksiaalivoima 3 kN (puristusta)
 taivutusmomentti 5000 Nm

LASKENTAA VARTEN MÄÄRITETYT LÄHTÖTIEDOT:

Materiaalivakiot

laipan suunnittelujännitys asennustilanteessa [MPa]	$f_a := 160$
laipan suunnittelujännitys koeponnistustilanteessa [MPa]	$f_k := 228$
laipan suunnittelujännitys suunnittelutilanteessa [MPa]	$f_s := 116$
ruuvien nimellinen jännitys asennustilanteessa ja koeponnistustilanteessa [MPa]	$f_{Ba} := 157$
ruuvien nimellinen jännitys suunnittelutilanteessa [MPa]	$f_{Bs} := 147$
laipan kimmokerroin asennus- ja koeponnistustilanteessa [MPa]	$E_{Fa} := 211800$
laipan kimmokerroin suunnittelutilanteessa [MPa]	$E_{Fs} := 198600$
ruuvien kimmokerroin asennus- ja koeponnistustilanteessa [MPa]	$E_{Ba} := 211800$
ruuvien kimmokerroin suunnittelutilanteessa [MPa]	$E_{Bs} := 198600$
laippamateriaalin lämpölaajenemiskerroin [1/ °C]	$\alpha_{Fa} := 0.0000126$
ruuvimateriaalin lämpölaajenemiskerroin [1/ °C]	$\alpha_{Fa} := 0.0000126$
suunnittelupaine [MPa]	$p_s := 0.8$
koeponnistuspaine [MPa]	$p_k := 1.26$
suunnittelulämpötila [°C]	$t_s := 200$
asennus- ja koeponnistuslämpötila [°C]	$t_a := 20$
ulkoinen voima [N]	$F_a := -3000$
ulkoinen momentti [Nm]	$M_a := 5000$

MITTATIEDOT

laipan ulkohalkaisija [mm]	$D := 340$
laipan sisähalkaisija [mm]	$d := 206.5$
jakoympyrän halkaisija [mm]	$D_{jako} := 295$
laipan tiivistepinnan ulkohalkaisija [mm]	$D_{FG} := 268$
laipan kaulusosan korkeus [mm]	$l_w := 22$
laipan kaulusosan ohuen pään paksuus [mm]	$s_0 := 6.3$

laipan kaulusosan paksun pään paksuus [mm] $S1 := 13.75$
 laippaosan paksuus [mm] $h := 24$
 ruuvien lukumäärä $n := 8$
 ruuvien koko (ulkohalkaisija [mm]) $M := 20$
 ruuvien sydänhalkaisija [mm] $db := 16.933$
 ruuvien sydänpinta-ala [mm²] $dA := \pi \cdot \frac{db^2}{4} = 225.194$
 voiteluaineen kitkakerroin ja kitkakerroin ruuvin/mutterin ja kannan välillä $\mu := 0.17$
 ruuvien nousu [mm] $p_t := 2.5$
 ruuvien kylkihalkaisija [mm] $dB2 := 18.4$
 mutterin kosketuspinnan halkaisija [mm] $dn := 26$
 kierteen profiilin puolikulma [rad] $\text{ruuvikulma} := 30 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.524$
 kiristyksen valvonta (momenttia valvotaan) $B_{cont} := 1$
 tiivisteiden ulkohalkaisija [mm] $D_g := 273$
 tiivisteiden sisähalkaisija [mm] $d_g := 220$
 tiivisteiden paksuus [mm] $e_g := 2$
 tiivisteiden pienin vaadittu puristusjännitys asennustilanteessa [MPa] $q_{min} := 25$
 tiivisteiden suurin sallittu puristusjännitys suunnittelutilanteessa [MPa] $q_{maxS} := 200$
 virumiskerroin asennustilanteessa $p_{qrA} := 0.94$
 virumiskerroin suunnittelutilanteessa $p_{qrS} := 0.81$
 tiivisteiden kimmokerroin asennustilanteessa [MPa] $E_{gA} := 1144$
 tiivisteiden kimmokerroin suunnittelutilanteessa [MPa] $E_{gS} := 1735$
 tiivistevakio $m_g := 4$
 korroosiovara [mm] $c_r := 1$

Mittaehtojen tarkastaminen

$$\frac{D}{d} = 1.646 \quad \text{alle } 5 \rightarrow \text{on OK} \quad \frac{(2 \cdot h)}{D - d} = 0.36 \quad \text{yli } 0,25 \rightarrow \text{OK}$$

$$\frac{(S1 - S0)}{l} = 0.339 \quad \text{alle } 0,4 \rightarrow \text{OK}$$

tiivisteiden leveys [mm] määritetty tiivistepinnan ulkohalkaisijan mukaan, koska se on tiivisteiden ulkohalkaisijaa pienempi

$$b_g := \frac{(D_{fg} - d_g)}{2} = 24$$

Koska tiivisteiden leveys ylittää arvon 15 mm, niin tiivisteiden tehollinen leveys lasketaan kaavasta:

$$b_{ge} := 3.8 \cdot \sqrt{b_g} = 18.616 \quad (5)$$

tiivisteen tehollinen halkaisija [mm] $d_{Ge} := D_{FG} - b_{Ge} = 249.384$ (7)

asennustilanteessa tarvittava tiivistevoima [N] $FG_0 := 0.5 \cdot \pi \cdot d_{Ge} \cdot b_{Ge} \cdot q_{min} = 1.823 \times 10^5$ (8)

koeponnistustilanteen tarvittava tiivistevoima [N] $FG_K := \pi \cdot d_{Ge} \cdot b_{Ge} \cdot m_G \cdot p_K = 7.351 \times 10^4$ (9)

suunnittelutilanteessa tarvittava tiivistevoima [N] $FG_S := \pi \cdot d_{Ge} \cdot b_{Ge} \cdot m_G \cdot p_S = 4.667 \times 10^4$ (10)

paineesta aiheutuva resultanttivoima suunnittelutilanteessa [N]

$$F_{PS} := 0.785 \cdot d_{Ge} \cdot d_{Ge} \cdot p_S = 3.906 \times 10^4 \quad (11)$$

paineesta aiheutuva resultanttivoima koeponnistustilanteessa [N]

$$F_{PK} := 0.785 \cdot d_{Ge} \cdot d_{Ge} \cdot p_K = 6.151 \times 10^4 \quad (11)$$

ulkoisten kuormitusten aiheuttama resultanttivoima [N]

$$FFM_{minus} := FAS - 4 \cdot \frac{MAS \cdot 1000}{d_{Ge}} = -8.32 \times 10^4 \quad (12)$$

$$FFM_{plus} := FAS + 4 \cdot \frac{MAS \cdot 1000}{d_{Ge}} = 7.72 \times 10^4 \quad (12)$$

tiivisteen joustavuus asennustilanteessa [mm/N]

$$y_{GA} := e_G \cdot \frac{p_{qrA}}{E_{gA} \cdot \pi \cdot d_{Ge} \cdot b_G} = 8.74 \times 10^{-8} \quad (I1)$$

tiivisteen joustavuus suunnittelutilanteessa [mm/N]

$$y_{GS} := e_G \cdot \frac{p_{qrS}}{E_{gS} \cdot \pi \cdot d_{Ge} \cdot b_G} = 4.966 \times 10^{-8} \quad (I1)$$

liitoksen pituus [mm] $LB_0 := 2 \cdot h + e_G = 50$

ruuvien tehollinen pituus [mm] $LB := LB_0 + 0.28 \cdot M = 55.6$

ruuvien joustavuus [mm/N]

$$y_B := \frac{LB}{E_{Ba} \cdot d_A \cdot n} = 1.457 \times 10^{-7} \quad (I2)$$

kauluksen kartio-osan pituusparametri [mm]

$$l_0 := \sqrt{(d \cdot S_0)} = 36.069 \quad (I3)$$

Laipan mitoista riippuvia kertoimia:

$$K_f := \frac{D}{d} = 1.646 \quad (I4)$$

$$BT1 := K_f^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K_f)) - 1 = 6.73 \quad BU1 := K_f^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K_f)) - 1 = 6.73$$

$$BT2 := (1.05 + 1.945 \cdot K_f^2) \cdot (K_f - 1) = 4.088 \quad BU2 := 1.36 \cdot (K_f^2 - 1) \cdot (K_f - 1) = 1.504$$

$$BT := \frac{BT1}{BT2} = 1.647 \quad (I5) \quad BU := \frac{BU1}{BU2} = 4.474 \quad (I6)$$

$$BY := \left[\frac{1}{(K_f - 1)} \right] \cdot \left[0.69 + 5.72 \cdot \frac{(K_f^2 \cdot \log(K_f))}{(K_f^2 - 1)} \right] = 4.103 \quad (I7)$$

$$BZ := \frac{(K_f^2 + 1)}{(K_f^2 - 1)} = 2.169 \quad (I8) \quad B := \frac{S1}{S0} = 2.183 \quad (I9)$$

$$x := \frac{1}{(\sqrt{d} \cdot S0)} = 0.61 \quad (I10) \quad \frac{1}{10} = 0.61$$

Seuraavat kolme muuttujaa on määritelty standardin kuvaajista I.2, I.3 ja I.4)

$$BF := 0.8 \quad BV := 0.18 \quad f := 1.1$$

Tässä vaiheessa kuvaajista luettuja arvoja verrattiin laskentatyökalun makron antamiin arvoihin

Arvot olivat hyvin lähellä toisiaan, jotta tulosten vertaaminen tästä eteenpäin olisi helpompaa annettiin muuttujille samat tarkemmat arvot kuin laskentatyökalussa.

$$BF := 0.797 \quad BV := 0.182 \quad f := 1.135$$

$$\lambda := \left[\frac{(BF \cdot h + 10)}{(BT \cdot 10)} \right] + \left[\frac{(BV \cdot h^3)}{(BU \cdot 10 \cdot S0^2)} \right] = 1.322 \quad (I11)$$

laipan kiertojoustavuus asennustilanteessa [1/Nmm]

$$YF := \left[\frac{(0.91 \cdot BV)}{(EFa \cdot \lambda \cdot S0^2 \cdot 10)} \right] = 4.131 \times 10^{-10} \quad (I12)$$

laipan kiertojoustavuus ulkoisen momentin alaisena [1/Nmm]

$$YFM := \left[\left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_{jako}}{(EFa \cdot D \cdot h^3)} \right] = 1.436 \times 10^{-10} \quad (I15)$$

$$\text{ruuvien momenttivarsi [mm]} \quad b := 0.5 \cdot (D_{jako} - d_{Ge}) = 22.808 \quad (E1)$$

liitoksen kokonaisjäykkyys [N/mm]

$$\gamma := \frac{1}{y_{GS} + \left(y_B \cdot \frac{EBa}{EBs} \right) + \left(2 \cdot YF \cdot \frac{EFa}{EFs} \right) \cdot b^2} = 1.507 \times 10^6 \quad (E8)$$

$$zeeta := 1 + (B - 1) \cdot \frac{x}{\left[x + \frac{(1 + B)}{4} \right]} = 1.513 \quad (E6)$$

$$\text{kaulusosan ekvivalentti paksuus [mm]} \quad Se := zeeta \cdot S0 = 9.533 \quad (E5)$$

$$\text{sisäisen paineen momenttivarsi [mm]} \quad e_{\text{m}} := 0.5 \cdot (d_{Ge} - d - Se) = 16.675 \quad (E4)$$

jäykkyyskertoimia:

$$\alpha := 1 - \frac{[y_{GA} - (2 \cdot YF \cdot e) \cdot b]}{[y_{GA} + y_B + (2 \cdot YF \cdot b^2)]} = 1.342 \quad (E11)$$

$$\alpha_{\text{fam}} := \frac{\left[y_B + 2 \cdot YFM \cdot b \cdot \left(b + e - \frac{e^2}{d_{Ge}} \right) \right]}{\left[y_B + y_{GA} \cdot \left(\frac{D_{\text{jako}}}{d_{Ge}} \right)^2 + 2 \cdot YFM \cdot b^2 \right]} = 0.951 \quad (E12)$$

lämpölaajenemisesta johtuva voima [N]

$$FT := \gamma \cdot [\alpha F \cdot h \cdot (t_S - t_A) \cdot 2 - \alpha_B \cdot 2 \cdot h \cdot (t_S - t_A)] = 0 \quad (13)$$

ASENNUSTILANTEESSA TARVITTAVA ESIKIRISTYSVOIMA FBA [N]

$$FB1_K := \alpha \cdot (FPK) + FGK = 1.561 \times 10^5$$

$$FB1_S := \alpha \cdot (FPS + FAS) + FGS + \frac{(4 \cdot \alpha_{\text{fam}} \cdot MAS \cdot 1000)}{d_{Ge}} = 1.713 \times 10^5$$

$$FB2_2 := 0.4 \cdot d_A \cdot n \cdot fBa = 1.131 \times 10^5$$

$$FG0 = 1.823 \times 10^5$$

FBA on suurin neljästä edellisestä ->

$$FBA := FG0 = 1.823 \times 10^5 \quad (17)$$

ruuvivoima koeponnistustilanteessa [N]

$$FBK := FBA + (1 - \alpha) \cdot FPK = 1.613 \times 10^5 \quad (18)$$

ruuvivoima suunnittelutilanteessa [N]

$$FBS := FBA + (1 - \alpha) \cdot (FPS + FAS) + \frac{[4 \cdot (1 - \alpha_{\text{fam}}) \cdot MAS \cdot 1000]}{d_{Ge}} = 1.739 \times 10^5 \quad (18)$$

Ruuvien lujuustarkastelu

asennustilanteessa ruuvissa vaikuttava jännitys [MPa]

$$\sigma_{B0} := \frac{F_{BA}}{(d_A \cdot n)} = 101.198 \quad (19)$$

asennustilanteen sallittu ruuvijännitys [MPa]

$$\sigma_{B0_sall} := 1.2 \cdot 1.1 \cdot 1.3 \cdot f_{Ba} = 269.412 \quad (D3)$$

$$\text{jännitysten suhde} \quad \frac{\sigma_{B0}}{\sigma_{B0_sall}} = 0.376 \quad \text{OK} \quad (21)$$

koeponnistustilanteessa ruuvissa vaikuttava jännitys [MPa]

$$\sigma_{B1} := \frac{F_{BK}}{(d_A \cdot n)} = 89.513 \quad (20)$$

koeponnistustilanteen sallittu jännitys [MPa]

$$\sigma_{B1_sall} := 1.35 \cdot 1.1 \cdot 1.3 \cdot f_{Ba} = 303.089 \quad (D4)$$

$$\text{jännitysten suhde} \quad \frac{\sigma_{B1}}{\sigma_{B1_sall}} = 0.295 \quad \text{OK} \quad (22)$$

suunnittelutilanteessa ruuvissa vaikuttava jännitys [MPa]

$$\sigma_{B2} := \frac{F_{BS}}{(d_A \cdot n)} = 96.524 \quad (20)$$

suunnittelutilanteen sallittu jännitys [MPa]

$$\sigma_{B2_sall} := 1 \cdot 1.1 \cdot 1.3 \cdot f_{Bs} = 210.21 \quad (D4)$$

$$\text{jännitysten suhde} \quad \frac{\sigma_{B2}}{\sigma_{B2_sall}} = 0.459 \quad \text{OK} \quad (22)$$

tiivisteen jännitys [MPa]

$$\frac{F_{BA}}{\pi \cdot d_{Ge} \cdot 0.5 \cdot b_{Ge}} = 25 \quad \frac{25}{200} = 0.125 \quad \text{OK} \quad (23)$$

LAIPPALIITOKSEN LUJUUSTARKASTELU**ASENNUSTILANNE**

$$CF := \sqrt{\frac{\left(\pi \cdot \frac{D_{jako}}{n}\right)}{2 \cdot M + \frac{(6 \cdot h)}{(mG + 0.5)}}} = 1.268 \quad (I18)$$

laippaan vaikuttava momentti [Nmm]

$$MA := CF \cdot FBA \cdot b = 5.274 \times 10^6 \quad (24)$$

koska $d < 20 \cdot S1$ ja $f > 1$ niin $dtähti := d + S0 = 212.8 \text{ mm}$ (I19)

jännitys kaulusosan paksussa päässä [MPa]

$$\sigma_{1A} := \frac{MA}{[\lambda \cdot (S1 - cr) \cdot (S1 - cr) \cdot dtähti]} = 115.315 \quad (28)$$

jännitys kaulusosan ohuessa päässä [MPa]

$$\sigma_{0A} := f \cdot \sigma_{1A} = 130.882 \quad (29)$$

laippaosan radiaali-jännitys [MPa]

$$\sigma_{RA} := \frac{(1.33 \cdot BF \cdot h + 10) \cdot MA}{(\lambda \cdot h^2 \cdot 10 \cdot d)} = 57.193 \quad (31)$$

laippaosan tangentiaali-jännitys [MPa]

$$\sigma_{TA} := \frac{(BY \cdot MA)}{(h^2 \cdot d)} - BZ \cdot \sigma_{RA} = 57.908 \quad (32)$$

LAIPAN JÄNNITYSTARKASTELU

kaulusosan paksu pää: suurimman seuraavista jännitysyhdistelmistä

$$\sigma_{1A} + \sigma_{RA} = 172.507$$

$$\sigma_{1A} + \sigma_{TA} = 173.223$$

$$\text{on oltava pienempi kuin } 1.3 \cdot 1.5 \cdot f_a = 312 \quad \frac{173.223}{312} = 0.555 \quad \text{OK} \quad (43)$$

kaulusosan ohut pää:

$$\sigma_{0A} \text{ on oltava pienempi kuin } 1.3 \cdot 3 \cdot f_a = 624 \quad \frac{\sigma_{0A}}{624} = 0.21 \quad \text{OK} \quad (45)$$

laippaosan osalta seuraavan ehdon on täyttyävä: suurimman seuraavista

$$\sigma_{RA} = 57.193$$

$$\sigma_{TA} = 57.908$$

$$\text{on oltava pienempi kuin } 1.3 \cdot f_a = 208 \quad \frac{\sigma_{TA}}{208} = 0.278 \quad \text{OK} \quad (54)$$

LAIPPALIITOKSEN LUJUUSTARKASTELU**KOEPONNISTUSTILANNE**

laippaan vaikuttava momentti [Nmm]

$$MK := CF \cdot (FBK \cdot b + FPK \cdot e) = 5.967 \times 10^6 \quad (26)$$

jännitys kaulusosan paksussa päässä (meridiaanitaivutusjännitys) [MPa]

$$\sigma_{1K} := \frac{MK}{[\lambda \cdot (S1 - cr)^2 \cdot d_{tähti}]} = 130.447 \quad (34)$$

jännitys kaulusosan ohuessa päässä (meridiaanitaivutusjännitys) [MPa]

$$\sigma_{0K} := f \cdot \sigma_{1K} = 148.058 \quad (35)$$

jännitys kaulusosan paksussa päässä (pitkittäinen kalvojännitys) [MPa]

$$\sigma_{1MMK} := \frac{FPK}{[\pi \cdot (d + S1) \cdot (S1 - cr)]} = 6.973 \quad (37)$$

jännitys kaulusosan ohuessa päässä (pitkittäinen kalvojännitys) [MPa]

$$\sigma_{0MMK} := \frac{FPK}{[\pi \cdot (d + S0) \cdot (S0 - cr)]} = 17.361 \quad (38)$$

kaulusosan tangentialinen kalvojännitys [MPa]

$$\sigma_{0MOK} := pK \cdot \frac{d}{[2 \cdot (S0 - cr)]} = 24.546 \quad (39)$$

radiaalijännitys laippaosassa [MPa]

$$\sigma_{RK} := \frac{[(1.33 \cdot BF \cdot h) + l0] \cdot MK}{(\lambda \cdot h^2 \cdot l0 \cdot d)} = 64.698 \quad (40)$$

tangentialijännitys laippaosassa [MPa]

$$\sigma_{TK} := \frac{(BY \cdot MK)}{(h^2 \cdot d)} - BZ \cdot \sigma_{RK} = 65.507 \quad (41)$$

LAIPAN JÄNNITYSTARKASTELU

kaulusosan paksu pää: suurimman seuraavista jännitysyhdistelmistä

$$\sigma_{1K} - \sigma_{1MMK} + \sigma_{RK} = 188.173$$

$$\sigma_{1K} - \sigma_{1MMK} + \sigma_{TK} = 188.982$$

$$\sigma_{1K} + \sigma_{1MMK} = 137.42$$

$$\text{on oltava pienempi kuin} \quad 1.3 \cdot 1.5 \cdot f_k = 444.6 \quad \frac{188.982}{444.6} = 0.425 \quad \text{OK} \quad (44)$$

kaulusosan ohut pää: suurimman seuraavista jännitysyhdistelmistä

$$\sigma_{0K} + \sigma_{0MMK} = 165.419$$

$$\sigma_{0K} - \sigma_{0MMK} = 130.696$$

$$0.3 \cdot \sigma_{0K} + \sigma_{0MOK} = 68.964$$

$$0.3 \cdot \sigma_{0K} - \sigma_{0MOK} = 19.871$$

$$0.7 \cdot \sigma_{0K} + (\sigma_{0MMK} - \sigma_{0MOK}) = 96.455$$

$$0.7 \cdot \sigma_{0K} - (\sigma_{0MMK} - \sigma_{0MOK}) = 110.825$$

$$\text{on oltava pienempi kuin } 1.3 \cdot f_k = 889.2 \quad \frac{165.419}{889.2} = 0.186 \quad \text{OK} \quad (46)$$

seuraavan ehdon on täyttyävä (kaulusosan ohuessa päässä):

suurimman seuraavista

$$\sigma_{0MOK} = 24.546$$

$$\sigma_{0MMK} = 17.361$$

$$\text{on oltava pienempi kuin } f_k = 228 \quad \frac{24.546}{228} = 0.108 \quad \text{OK} \quad (53)$$

laippaosan osalta seuraavan ehdon on täyttyävä: suurimman seuraavista

$$\sigma_{RK} = 64.698$$

$$\sigma_{TK} = 65.507$$

$$\text{on oltava pienempi kuin } 1.3 \cdot f_k = 296.4 \quad \frac{65.507}{296.4} = 0.221 \quad \text{OK} \quad (55)$$

laipan kiertymäkulma [°]

$$M_K \cdot Y_F \cdot \frac{180}{\pi} = 0.141$$

sallittu kiertymäkulma [°]

$$1.3 \cdot 0.006 \cdot \frac{180}{\pi} = 0.447 \quad \frac{0.141}{0.447} = 0.315 \quad \text{OK} \quad (58)$$

LAIPPALIITOKSEN LUJUUSTARKASTELU

SUUNNITTELUTILANNE

katsotaan suurin näistä:

$$FBS \cdot b + (FPS + FFM_{\text{minus}}) \cdot e = 3.23 \times 10^6$$

$$FBS \cdot b + (FPS + FFM_{\text{plus}}) \cdot e = 5.905 \times 10^6$$

$$|FPS + FFM_{\text{minus}}| \cdot e = 7.361 \times 10^5$$

$$|FPS + FFM_{\text{plus}}| \cdot e = 1.939 \times 10^6$$

laippaan vaikuttava momentti [Nmm]

$$MS := CF \cdot [FBS \cdot b + (FPS + FFM_{\text{plus}}) \cdot e] = 7.49 \times 10^6 \quad (26)$$

jännitys kaulusosan paksussa päässä (meridiaanitaivutusjännitys) [MPa]

$$\sigma_{1S} := \frac{MS}{[\lambda \cdot (S1 - cr)^2 \cdot dtähti]} = 163.75 \quad (34)$$

jännitys kaulusosan ohuessa päässä (meridiaanitaivutusjännitys) [MPa]

$$\sigma_{0S} := f \cdot \sigma_{1S} = 185.856 \quad (35)$$

katsotaan suurempi näistä:

$$FAS + 4 \cdot \frac{MAS \cdot 1000}{dGe} = 7.72 \times 10^4$$

$$FAS - 4 \cdot \frac{MAS \cdot 1000}{dGe} = -8.32 \times 10^4$$

jännitys kaulusosan paksussa päässä (pitkittäinen kalvojäännitys) [MPa]

$$\sigma_{1MMS} := \frac{\left(FPS + FAS + 4 \cdot \frac{MAS \cdot 1000}{dGe} \right)}{[\pi \cdot (d + S1) \cdot (S1 - cr)]} = 13.178 \quad (37)$$

jännitys kaulusosan ohuessa päässä (pitkittäinen kalvojäännitys) [MPa]

$$\sigma_{0MMS} := \frac{\left(FPS + FAS + 4 \cdot \frac{MAS \cdot 1000}{dGe} \right)}{[\pi \cdot (d + S0) \cdot (S0 - cr)]} = 32.81 \quad (38)$$

kaulusosan tangentiaalinen kalvojäännitys [MPa]

$$\sigma_{0MOS} := \frac{(pS \cdot d)}{[2 \cdot (S0 - cr)]} = 15.585 \quad (39)$$

radiaaliäännitys laippaosassa [MPa]

$$\sigma_{RS} := \frac{(1.33 \cdot BF \cdot h + l0)}{(\lambda \cdot h^2 \cdot l0 \cdot d)} \cdot MS = 81.215 \quad (40)$$

tangentiaaliäännitys laippaosassa [MPa]

$$\sigma_{TS} := \frac{(BY \cdot MS)}{(h^2 \cdot d)} - BZ \cdot \sigma_{RS} = 82.231 \quad (41)$$

LAIPAN JÄNNITYSTARKASTELU

kaulusosan paksu pää: suurimman seuraavista jännitysyhdistelmistä

$$\sigma_{1S} - \sigma_{1MMS} + \sigma_{RS} = 231.787$$

$$\sigma_{1S} - \sigma_{1MMS} + \sigma_{TS} = 232.803$$

$$\sigma_{1S} + \sigma_{1MMS} = 176.927$$

$$\text{on oltava pienempi kuin } 1.3 \cdot 1.5 \cdot f_s = 226.2 \quad \frac{232.803}{226.2} = 1.029 \quad \text{EI OK} \quad (44)$$

kaulusosan ohut pää: suurimman seuraavista jännitysyhdistelmistä

$$\sigma_{0S} + \sigma_{0MMS} = 218.666$$

$$\sigma_{0S} - \sigma_{0MMS} = 153.045$$

$$0.3 \cdot \sigma_{0S} + \sigma_{0MOS} = 71.342$$

$$0.3 \cdot \sigma_{0S} - \sigma_{0MOS} = 40.172$$

$$0.7 \cdot \sigma_{0S} + (\sigma_{0MMS} - \sigma_{0MOS}) = 147.325$$

$$0.7 \cdot \sigma_{0S} - (\sigma_{0MMS} - \sigma_{0MOS}) = 112.873$$

$$\text{on oltava pienempi kuin } 1.3 \cdot 3 \cdot f_s = 452.4 \quad \frac{218.666}{452.4} = 0.483 \quad \text{OK} \quad (46)$$

seuraavan ehdon on täyttyävä (kaulusosan ohuessa päässä):

suurimman seuraavista

$$\sigma_{0MOS} = 15.585$$

$$\sigma_{0MMS} = 32.81$$

$$\text{on oltava pienempi kuin } f_s = 116 \quad \frac{32.81}{116} = 0.283 \quad \text{OK} \quad (53)$$

laippaosan osalta seuraavan ehdon on täyttyävä: suurimman seuraavista

$$\sigma_{RS} = 81.215$$

$$\sigma_{TS} = 82.231$$

$$\text{on oltava pienempi kuin } 1.3 \cdot f_s = 150.8 \quad \frac{82.231}{150.8} = 0.545 \quad \text{OK} \quad (55)$$

laipan kiertymäkulma [°]

$$MS \cdot YF \cdot \frac{EF_a}{EF_s} \cdot \frac{180}{\pi} = 0.189$$

sallittu kiertymäkulma [°]

$$0.006 \cdot \frac{180}{\pi} = 0.344 \quad \frac{0.189}{0.344} = 0.549 \quad \text{OK} \quad (58)$$

KIRISTYSMOMENTTI

Tämä määrittely ei ole standardin GOST R 52857.4:2007 mukainen, vaan noudattelee standardin SFS-EN 1591-1:2014 käyttämää tapaa

ruuvien momenttivarsi [mm]

$$k_B := \frac{p_t}{(2 \cdot \pi)} + \frac{(\mu \cdot d_B^2)}{(2 \cdot \cos(\text{ruuvikulma}))} + 0.5 \cdot \mu \cdot d_n = 4.414$$

kiristysmomentti [Nm]

$$M_T := k_B \cdot \frac{F_{BA}}{n \cdot 1000} = 100.587$$